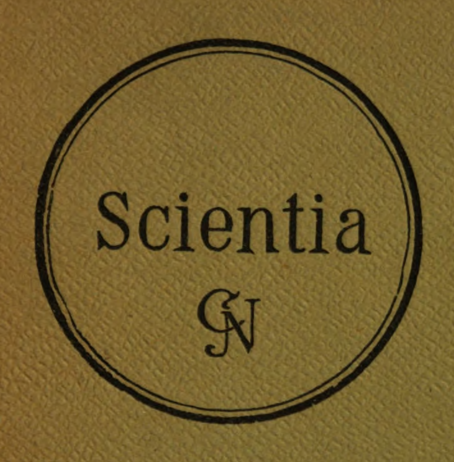


H. Poincaré

La théorie de Maxwell et les oscillations Hertziennes

C. NAUD. Éditeur

1387

SCIENTIA
Février 1904

PHYS.-MATHÉMATIQUE
n° 23

LA

THÉORIE DE MAXWELL

ET LES

OSCILLATIONS HERTZIENNES

LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

PAR

H. POINCARÉ

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre premier. — *Généralités sur les phénomènes électriques.*

Chapitre II. — *La théorie de Maxwell.*

Chapitre III. — *Les oscillations électriques avant Hertz.*

Chapitre IV. — *L'excitateur de Hertz.*

Chapitre V. — *Moyens d'observation.*

Chapitre VI. — *Le cohéreur.*

Chapitre VII. — *Propagation le long d'un fil.*

Chapitre VIII. — *Mesure des longueurs d'onde et résonance multiple.*

Chapitre IX. — *Propagation dans l'air.*

Chapitre X. — *Propagation dans les diélectriques.*

Chapitre XI. — *Production des vibrations très rapides et très lentes.*

Chapitre XII. — *Imitation des phénomènes optiques.*

Chapitre XIII. — *Synthèse de la lumière.*

Chapitre XIV. — *Principe de la télégraphie sans fil.*

LA THÉORIE DE MAXWELL

ET

LES OSCILLATIONS HERTZIENNES

LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS SUR LES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES

1. **Tentatives d'explication mécanique**. — Donner des phénomènes électriques une explication mécanique complète, réduisant les lois de la physique aux principes fondamentaux de la dynamique, c'est là un problème qui a tenté bien des chercheurs. N'est-ce pas cependant une question un peu oiseuse et où nos forces se consumeraient en pure perte ?

Si elle ne comportait qu'une seule solution, la possession de cette solution unique, qui serait la vérité, ne saurait être payée trop cher. Mais il n'en est pas ainsi : on arriverait sans doute à inventer un mécanisme donnant une imitation plus ou moins parfaite des phénomènes électrostatiques et électrodynamiques. Mais, si l'on peut en imaginer un, on pourra en imaginer une infinité d'autres.

Il ne semble pas d'ailleurs qu'aucun d'entre eux s'impose jusqu'ici à notre choix par sa simplicité. Dès lors, on ne voit pas bien pourquoi l'un d'eux nous ferait, mieux que les autres, pénétrer le secret de la nature. Il en résulte que tous ceux que l'on peut proposer ont je ne sais quel caractère artificiel qui répugne à la raison.

L'un des plus complets avait été développé par Maxwell, à une époque où ses idées n'avaient pas encore pris leur forme définitive. La structure compliquée qu'il attribuait à l'éther rendait son système bizarre et rébarbatif ; on aurait cru lire la description d'une usine avec des engrenages, des bielles transmettant le mouve-

ment et fléchissant sous l'effort, des régulateurs à boules et des courroies.

Quel que soit le goût des Anglais pour ce genre de conceptions dont ils aiment l'apparence concrète, Maxwell fut le premier à abandonner cette théorie saugrenue qui ne figure pas dans ses œuvres complètes. On ne doit pas regretter cependant que sa pensée ait suivi ce chemin détourné, puisqu'elle a été ainsi conduite aux plus grandes découvertes.

En suivant la même voie, il ne semble pas qu'on puisse faire beaucoup mieux. Mais s'il est oiseux de chercher à se représenter dans tous ses détails le mécanisme des phénomènes électriques, il est très important au contraire de montrer que ces phénomènes obéissent aux lois générales de la mécanique.

Ces lois, en effet, sont indépendantes du mécanisme particulier auquel elles s'appliquent. Elles doivent se retrouver invariables à travers la diversité des apparences. Si les phénomènes électriques y échappaient, on devrait renoncer à tout espoir d'explication mécanique. S'ils y obéissent, la possibilité de cette explication est certaine, et on n'est arrêté que par la difficulté de choisir entre toutes les solutions que le problème comporte.

Mais comment nous assurons-nous, sans déployer tout l'appareil de l'analyse mathématique, de la conformité des lois de l'électrostatique et de l'électrodynamique avec les principes de la dynamique ?

C'est par une série de comparaisons ; quand nous voudrons analyser un phénomène électrique, nous prendrons un ou deux phénomènes mécaniques bien connus et nous chercherons à mettre en évidence leur parfait parallélisme. Ce parallélisme nous sera ainsi un garant suffisant de la possibilité d'une explication mécanique.

L'emploi de l'analyse mathématique ne servirait qu'à montrer que ces comparaisons ne sont pas seulement de grossiers rapprochements, mais qu'elles se poursuivent jusque dans les détails les plus précis. Les limites de cet ouvrage ne me permettront pas d'aller aussi loin, et je devrai me borner à une comparaison pour ainsi dire qualitative.

2. **Phénomènes électrostatiques.** — Pour charger un condensateur, il faut toujours dépenser du travail, du travail mécanique si l'on fait tourner une machine statique ou si l'on se sert d'une dynamo, de l'énergie chimique si on charge avec une pile.

Mais l'énergie ainsi dépensée n'est pas perdue, elle est emmagasinée dans le condensateur qui peut la restituer à la décharge. Elle sera restituée sous forme de chaleur, si l'on réunit simplement les deux armatures par un fil qui est échauffé par le courant de décharge ; elle pourrait l'être aussi sous forme de travail mécanique, si ce courant de décharge actionnait un petit moteur électrique.

De même, pour élever de l'eau dans un réservoir, il faut dépenser du travail ; mais ce travail peut être restitué si, par exemple, l'eau du réservoir sert à faire tourner une roue hydraulique.

Si deux conducteurs chargés sont au même potentiel, et qu'on les mette en communication par un fil, l'équilibre ne sera pas troublé ; mais si les potentiels initiaux sont différents, un courant circulera dans le fil d'un conducteur à l'autre, jusqu'à ce que l'égalité de potentiel soit rétablie.

De même, si dans deux réservoirs, l'eau monte à des niveaux différents, et si on les fait communiquer par un tuyau, l'eau coulera de l'un à l'autre jusqu'à ce que le niveau soit le même dans les deux réservoirs.

Le parallélisme est donc complet : le potentiel d'un condensateur correspond au niveau d'eau dans un réservoir, la *charge* du condensateur à la masse d'eau contenue dans le réservoir.

Si la section horizontale du réservoir est par exemple 100 mètres carrés, il faudra 1 mètre cube d'eau pour faire monter le niveau d'un centimètre. Il en faudra deux fois plus si la section est deux fois plus grande. Cette section horizontale correspond donc à ce qu'on appelle la *capacité* du condensateur.

Comment interpréter dans cette manière de voir les attractions et répulsions qui s'exercent entre les corps électrisés ?

Ces actions mécaniques tendent à diminuer les différences de potentiel. Si on les vainc, et qu'on éloigne par exemple deux corps qui s'attirent, on dépense du travail, on emmagasine de l'énergie électrique et on accroît les différences de potentiel. Si, au contraire, on laisse les conducteurs libres d'obéir à leur attraction mutuelle, l'énergie électrique ainsi emmagasinée est en partie restituée sous forme de travail mécanique, et les potentiels tendent à s'égaliser.

Ces actions mécaniques correspondraient ainsi aux pressions que l'eau, amassée dans les réservoirs, exerce sur leurs parois. Supposons, par exemple, que nos deux réservoirs soient réunis

par un tube cylindrique horizontal de large section, et que dans ce tube se meuve un piston. Quand on poussera le piston de façon à refouler l'eau dans celui des réservoirs où le niveau est le plus élevé, on dépensera du travail; si on laisse au contraire le piston obéir aux pressions qui s'exercent sur ses deux faces, il se déplacera de telle sorte que les niveaux tendent à s'égaliser, et l'énergie emmagasinée dans les réservoirs sera en partie restituée.

Cette comparaison hydraulique est la plus commode et la plus complète; ce n'est pas la seule possible; nous pouvons, par exemple, comparer le travail dépensé pour charger un condensateur à celui qu'on emploie pour élever un poids ou pour bander un ressort. Cette dépense d'énergie sera récupérée quand on laissera ce poids redescendre ou ce ressort se débander, comme quand on laissera les deux armatures du condensateur obéir à leur attraction mutuelle.

Nous nous servirons dans la suite des trois comparaisons.

3. **Résistance des conducteurs**. — Mettons nos deux réservoirs en communication par un tube horizontal, long et de section étroite. L'eau s'écoulera lentement par ce tube, et le débit sera d'autant plus grand que la différence de niveau sera plus grande la section plus large, le tube plus court. En d'autres termes, la résistance du tube qui est due aux frottements internes, croîtra avec sa longueur et décroîtra quand la section augmentera.

Joignons de même deux conducteurs par un fil métallique long et mince. L'intensité du courant, c'est-à-dire le débit d'électricité, croîtra avec la différence des deux potentiels, avec la section du fil, et sera au contraire en raison inverse de sa longueur.

La résistance électrique d'un fil est donc assimilable à la résistance hydraulique de notre tube; c'est un véritable frottement. La similitude est d'autant plus complète que cette résistance échauffe le fil et produit de la chaleur comme le frottement.

Elle devient frappante dans l'expérience bien connue de Foucault; qu'on fasse tourner un disque de cuivre dans un champ magnétique, on aura à surmonter une résistance considérable, et le disque s'échauffera; tout se passera comme si ce disque frottait contre quelque frein invisible.

4. **Induction**. — Quand deux fils sont voisins l'un de l'autre et que le premier est parcouru par un courant variable, il se produit dans le second des courants connus sous le nom de courants

d'induction. Si le courant primaire est croissant, le courant secondaire est de sens opposé au primaire ; il est de même sens, si le primaire est décroissant. C'est là ce qu'on appelle l'*induction mutuelle*.

Mais ce n'est pas tout : un courant variable produira des forces électromotrices d'induction dans le fil même qu'il parcourt. Cette force sera résistante si le courant est croissant, elle tendra à renforcer le courant s'il est décroissant : c'est ce qu'on nomme la *self-induction*.

Dans notre comparaison, la self-induction s'explique aisément. Il semble que, pour mettre l'électricité en mouvement, on ait à surmonter une résistance contre-électromotrice ; mais qu'une fois le mouvement commencé, il tende à se continuer de lui-même. *La self-induction est donc une sorte d'inertie.*

De même, il faut surmonter une résistance pour faire démarrer un véhicule, et, une fois lancé il continue de lui-même son mouvement.

En résumé, un courant peut avoir à surmonter :

1° La résistance ohmique du fil (qui existe toujours et s'oppose toujours au courant) ;

2° La self-induction, si le courant est variable ;

3° Des forces contre-électromotrices d'origine électrostatique, s'il y a des charges électriques dans le voisinage du fil ou sur le fil.

Ces deux dernières résistances peuvent d'ailleurs devenir négatives et tendre à renforcer le courant.

Comparons avec les résistances que rencontre un véhicule qui se meut sur une route :

1° La résistance ohmique, nous l'avons vu, est analogue au frottement ;

2° La self-induction correspond à l'inertie du véhicule ;

3° Enfin les forces d'origine électrostatique correspondraient à la pesanteur, qu'il faut vaincre dans les montées et qui devient une aide dans les descentes.

Pour l'induction mutuelle, les choses sont un peu plus compliquées. Figurons-nous une sphère S d'une masse considérable ; cette sphère porte deux longs bras diamétralement opposés, et aux extrémités de ces deux bras sont de petites sphères s_1 et s_2 ; le tout se comportant comme un seul corps solide.

S représentera l'éther, s_1 le courant primaire, s_2 le courant secondaire.

Si nous cherchons à mettre en mouvement la petite sphère s_1,

nous pourrons le faire sans trop de peine ; mais la sphère S ne s'ébranlera pas si facilement ; dans les premiers moments, elle restera immobile. Tout le système tournera autour de S, et la sphère s_2 prendra un mouvement contraire à celui de s_1.

C'est là l'image de l'induction mutuelle. Les sphères s_1 et s_2 correspondent aux deux conducteurs ; la sphère S qu'il faut se représenter comme invisible, c'est l'éther qui les entoure. Quand le mouvement de s_1 s'accélère, s_2 prend un mouvement de direction opposée ; de même quand le courant primaire s'accélère, il se produit un courant secondaire de sens contraire.

Poursuivons la comparaison. Je suppose que s_1 et s_2 aient à surmonter, pour se mouvoir, un certain frottement (c'est la résistance ohmique des deux conducteurs) ; au contraire S n'a d'autre résistance à vaincre que son inertie. Supposons que la force motrice continue à agir sur s_1 : le régime finira par s'établir : la sphère s_1 se mouvra d'un mouvement uniforme, entraînant S qui, une fois en mouvement, n'oppose plus de résistance. Au contraire s_2, par l'effet du frottement, s'arrêtera, et tout le système tournera autour de s_2. Le courant primaire est devenu constant, le courant secondaire a cessé.

Enfin la force motrice cesse d'agir sur s_1 : par suite du frottement son mouvement va se ralentir. Mais S, en vertu de son énorme inertie, continue son mouvement entraînant s_2 qui prend une vitesse de même sens que celle de s_1. Le courant primaire diminue, le courant induit est de même sens que le primaire.

Dans cette image, S représente l'éther qui entoure les deux fils : c'est l'inertie de cet éther qui produit les phénomènes d'induction mutuelle. Il en est de même dans le cas de la self-induction. L'inertie qu'il faut vaincre pour produire un courant dans un fil, ce n'est pas celle de l'éther qui pénètre ce fil, c'est celle de l'éther qui l'entoure.

5. **Attractions électrodynamiques.** — J'ai cherché plus haut à faire comprendre, par une comparaison, l'explication des attractions électrostatiques et des phénomènes d'induction ; voyons maintenant quelle idée se fait Maxwell de la cause qui produit les attractions mutuelles de courants.

Tandis que les attractions électrostatiques seraient dues à la tension d'une multitude de petits ressorts, ou, en d'autres termes, à l'élasticité de l'éther, ce seraient la force vive et l'inertie de ce

fluide qui produiraient les phénomènes d'induction et les actions électrodydamiques.

Le calcul complet est beaucoup trop long pour trouver place ici, et je me contenterai encore d'une comparaison. Je l'emprunterai à un appareil bien connu, le régulateur à force centrifuge.

La force vive de cet appareil est proportionnelle au carré de la vitesse angulaire de rotation et au carré de l'écartement des boules.

D'après l'hypothèse de Maxwell, l'éther est en mouvement dès qu'il y a des courants voltaïques, et sa force vive est proportionnelle au carré de l'intensité de ces courants, qui correspond ainsi, dans le parallèle que je cherche à établir, à la vitesse angulaire de rotation.

Si nous considérons deux courants de même sens, cette force vive, à intensité égale, sera d'autant plus grande que les courants seront plus rapprochés ; si les courants sont de sens contraire, elle sera d'autant plus grande qu'ils seront plus éloignés.

Cela posé, poursuivons notre comparaison.

Pour augmenter la vitesse angulaire du régulateur, et par suite sa force vive, il faut lui fournir du travail, et surmonter par conséquent une résistance que l'on appelle son *inertie*.

De même, augmenter l'intensité des courants, c'est augmenter la force vive de l'éther ; et il faudra, pour le faire, fournir du travail et surmonter une résistance, qui n'est autre chose que l'inertie de l'éther, et que l'on appelle l'*induction*.

La force vive sera plus grande si les courants sont de même sens et rapprochés ; le travail à fournir et la force contre-électromotrice d'induction seront donc plus grands. C'est ce que l'on exprime, dans le langage ordinaire, en disant que l'induction mutuelle des deux courants s'ajoute à leur self-induction. C'est le contraire, si les deux courants sont de sens opposé.

Si l'on écarte les boules du régulateur, il faudra, pour maintenir la vitesse angulaire, fournir du travail, parce que, à vitesse angulaire égale, la force vive est d'autant plus grande que les boules sont plus écartées.

De même, si deux courants sont de même sens et qu'on les rapproche, il faudra, pour maintenir l'intensité, fournir du travail, puisque la force vive augmentera. On aura donc à surmonter une force électromotrice d'induction qui tendrait à diminuer l'intensité des courants. Elle tendrait au contraire à l'augmenter, si les

courants étaient de même sens, et qu'on les éloignât, ou s'ils étaient de sens contraire, et qu'on les rapprochât.

Les actions mécaniques mutuelles des courants s'expliquent de même.

La force centrifuge tend à écarter les boules, *ce qui aurait pour effet d'augmenter la force vive, si l'on maintenait la vitesse angulaire constante*.

De même ,quand les courants sont de même sens, *ils s'attirent* c'est-à-dire qu'ils tendent à se rapprocher, *ce qui aurait pour effet d'augmenter la force vive, si l'on maintenait l'intensité constante*. S'ils sont de sens contraire, ils se repoussent et tendent à s'éloigner, ce qui aurait encore pour effet d'augmenter la force vive à intensité constante.

En résumé, dans notre comparaison, si nous supposons les deux courants de sens contraire, la vitesse de rotation correspond à l'intensité et l'écartement des boules à l'écartement des courants. Les boules tendent à s'écarter et semblent se repousser, de même les deux courants se repoussent.

Ainsi les phénomènes électrostatiques seraient dus à l'élasticité de l'éther, et les phénomènes électrodynamiques à sa force vive. Maintenant, cette élasticité elle-même devrait-elle s'expliquer, comme le pense lord Kelvin, par des rotations de très petites parties de fluide ? Diverses raisons peuvent rendre cette hypothèse séduisante, mais elle ne joue aucun rôle essentiel dans la théorie de Maxwell, qui en est indépendante.

Dans tout ce qui précède, j'ai fait des comparaisons avec divers mécanismes. Mais ce ne sont que des comparaisons, même assez grossières. Il ne faut pas, en effet, chercher dans le livre de Maxwell une explication mécanique complète des phénomènes électriques, mais seulement l'exposé des conditions auxquelles toute explication doit satisfaire. Et ce qui fait justement que l'œuvre de Maxwell sera probablement durable, c'est qu'elle est indépendante de toute explication particulière.

CHAPITRE II

LA THÉORIE DE MAXWELL

1. **Rapports entre la lumière et l'électricité.** — Au moment où les expériences de Fresnel forçaient tous les savants à admettre que la lumière est due aux vibrations d'un fluide très subtil, remplissant les espaces interplanétaires, les travaux d'Ampère faisaient connaître les lois des actions mutuelles des courants et fondaient l'Electrodynamique.

On n'avait qu'un pas à faire pour supposer que ce même fluide, l'éther, qui est la cause des phénomènes lumineux, est en même temps le véhicule des actions électriques : ce pas, l'imagination d'Ampère le fit : mais l'illustre physicien, en énonçant cette séduisante hypothèse, ne prévoyait sans doute pas qu'elle dût si vite prendre une forme plus précise et recevoir un commencement de confirmation.

Ce ne fut là pourtant qu'un rêve sans consistance jusqu'au jour où les mesures électriques mirent en évidence un fait inattendu.

Le rapport de « l'unité absolue électrostatique » à « l'unité absolue électrodynamique » est mesuré par une vitesse. Maxwell imagina plusieurs méthodes pour obtenir la valeur de cette vitesse. Les résultats auxquels il parvint, oscillèrent autour de 300 000 kilomètres par seconde, c'est-à-dire de la vitesse même de la lumière.

Les observations devinrent bientôt assez précises pour qu'on ne pût songer à attribuer cette concordance au hasard. On ne pouvait donc douter qu'il y eût certains rapports intimes entre les phénomènes optiques et les phénomènes électriques. Mais la nature de ces rapports nous échapperait peut-être encore, si le génie de Maxwell ne l'avait devinée.

Cette coïncidence inattendue pouvait s'interpréter de la façon suivante. Le long d'un fil, conducteur parfait, une perturbation électrique se propage avec la vitesse de la lumière. Les calculs de

Kirchhoff, fondés sur l'ancienne électrodynamique conduisaient à ce résultat.

Mais ce n'est pas le long d'un fil métallique que la lumière se propage, c'est à travers les corps transparents, à travers l'air, à travers le vide. Une pareille propagation n'était nullement prévue par l'ancienne électrodynamique.

Pour pouvoir tirer l'optique des théories électrodynamiques alors en faveur, il fallait modifier profondément ces dernières, sans qu'elles cessent de rendre compte de tous les faits connus. C'est ce qu'a fait Maxwell.

2. **Courants de déplacement**. — Tout le monde sait que l'on peut répartir les corps en deux classes, les conducteurs où nous constatons des déplacements de l'électricité, c'est-à-dire des courants voltaïques, et les isolants ou diélectriques. Pour les anciens électriciens, les diélectriques étaient purement inertes, et leur rôle se bornait à s'opposer au passage de l'électricité. S'il en était ainsi, on pourrait remplacer un isolant quelconque par un isolant différent sans rien changer aux phénomènes. Les expériences de Faraday ont montré qu'il n'en est pas ainsi ; deux condensateurs de même forme et de mêmes dimensions, mis en communication avec les mêmes sources d'electricité, ne prennent pas la même charge, bien que l'épaisseur de la lame isolante soit la même, si la *nature* de la matière isolante diffère. Maxwell avait fait une étude trop profonde des travaux de Faraday pour ne pas comprendre l'importance des diélectriques et la nécessité de leur restituer leur véritable rôle.

D'ailleurs, s'il est vrai que la lumière ne soit qu'un phénomène électrique, il faut bien quand elle se propage à travers un corps isolant, que ce corps soit le siège de ce phénomène : il doit donc y avoir des phénomènes électriques localisés dans les diélectriques: mais quelle en peut être la nature ? Maxwell répond hardiment : ce sont des courants.

Toute l'expérience de son temps semblait le contredire : on n'avait jamais observé de courants que dans les conducteurs. Comment Maxwell pouvait-il concilier son audacieuse hypothèse avec un fait si bien constaté ? Pourquoi dans certaines circonstances, ces courants hypothétiques produisent-ils des effets manifestes et sont-ils absolument inobservables dans les conditions ordinaires ?

C'est que les diélectriques opposent au passage de l'électri-

cité, non pas une résistance plus grande que les conducteurs, mais une résistance d'une autre nature. Une comparaison fera mieux comprendre la pensée de Maxwell.

Si l'on s'efforce de tendre un ressort, on rencontre une résistance qui va en croissant à mesure que le ressort se bande. Si donc on ne dispose que d'une force limitée, il arrivera un moment où cette résistance ne pouvant plus être surmontée, le mouvement s'arrêtera et l'équilibre s'établira; enfin quand la force cessera d'agir, le ressort restituera en se débandant tout le travail qu'on aura dépensé pour le bander.

Supposons au contraire qu'on veuille déplacer un corps plongé dans l'eau : ici encore on éprouvera une résistance, qui dépendra de la vitesse, mais qui cependant, si cette vitesse demeure constante, n'ira pas en croissant à mesure que le corps s'avancera; le mouvement pourra donc se prolonger tant que la force motrice agira, et l'on n'atteindra jamais l'équilibre ; enfin quand la force disparaîtra, le corps ne tendra pas à revenir en arrière, et le travail dépensé pour le faire avancer ne pourra être restitué; il aura tout entier été transformé en chaleur par la viscosité de l'eau.

Le contraste est manifeste, et il est nécessaire de distinguer la résistance *élastique* de la résistance *visqueuse*. Alors les diélectriques se comporteraient pour les mouvements de l'électricité comme les solides élastiques pour les mouvements matériels, tandis que les conducteurs se comporteraient comme les liquides visqueux. De là, deux catégories de courants : les courants de *déplacement* ou de Maxwell qui traversent les diélectriques, et les courants ordinaires de *conduction* qui circulent dans les conducteurs.

Les premiers, ayant à surmonter une sorte de résistance *élastique*, ne pourraient être que de courte durée ; car, cette résistance croissant sans cesse, l'équilibre sera promptement établi.

Les courants de conduction, au contraire, devraient vaincre une sorte de résistance visqueuse et pourraient par conséquent se prolonger aussi longtemps que la force électromotrice qui leur donne naissance.

Reprenons notre comparaison empruntée à l'Hydraulique. Supposons que nous ayons dans un réservoir de l'eau sous pression ; mettons ce réservoir en communication avec le tuyau vertical : l'eau va y monter ; mais le mouvement s'arrêtera dès que l'équilibre hydrostatique sera atteint. Si le tuyau est large il n'y

aura pas de frottement ni de perte de charge, et l'eau ainsi élevée pourra être employée pour produire du travail. Nous avons là l'image du courant de déplacement.

Si au contraire l'eau du réservoir s'écoule par un tuyau horizontal, le mouvement continuera tant que le réservoir ne sera pas vide; mais si le tuyau est étroit il y aura une perte de travail considérable et une production de chaleur par le frottement ; nous avons là l'image du courant de conduction.

Bien qu'il soit impossible et quelque peu oiseux de chercher à se représenter tous les détails du mécanisme, on peut dire que tout se passe comme si les courants de déplacement avaient pour effet de bander une multitude de petits ressorts. Quand ces courants cessent, l'équilibre électrostatique est établi, et ces ressorts sont d'autant plus tendus que le champ électrique est plus intense. Le travail accumulé dans ces ressorts, c'est-à-dire l'énergie électrostatique, peut être restituée intégralement dès qu'ils peuvent se débander; c'est ainsi qu'on obtient du travail mécanique quand on laisse les conducteurs obéir aux *attractions électrostatiques*. Ces attractions seraient dues ainsi à la pression exercée sur les conducteurs par les ressorts bandés. Enfin pour poursuivre la comparaison jusqu'au bout, il faudrait rapprocher la décharge disruptive de la rupture de quelques ressorts trop tendus.

Au contraire, le travail employé à produire des courants de conduction est perdu et tout entier transformé en chaleur, comme celui que l'on dépense pour vaincre les frottements ou la viscosité des fluides. *C'est pour cela que les fils conducteurs s'échauffent.*

Dans la manière de voir de Maxwell, *il n'y a que des courants fermés*. Pour les anciens électriciens il n'en était pas de même : ils regardaient comme fermé le courant qui circule dans un fil joignant les deux pôles d'une pile. Mais si, au lieu de réunir directement les deux pôles, on les met respectivement en communication avec les deux armatures d'un condensateur le courant instantané qui dure jusqu'à ce que le condensateur soit chargé, était considéré comme ouvert; il allait, pensait-on, d'une armature à l'autre à travers le fil de communication et la pile, et s'arrêtait à la surface de ces deux armatures. Maxwell, au contraire, suppose que le courant traverse sous forme de courant de déplacement, la lame isolante qui sépare les deux armatures et qu'il se ferme ainsi complète-

ment. La résistance élastique qu'il rencontre dans ce passage explique sa faible durée.

Les courants peuvent se manifester de trois manières : par leurs effets calorifiques, par leur action sur les aimants et les courants, par les courants induits auxquels ils donnent naissance. Nous avons vu plus haut pourquoi les courants de conduction développent de la chaleur et pourquoi les courants de déplacement n'en font pas naître. En revanche, d'après l'hypothèse de Maxwell, les courants qu'il imagine doivent, comme les courants ordinaires, produire des effets électromagnétiques électrodynamiques et inductifs.

Pourquoi ces effets n'ont-ils encore pu être mis en évidence ? C'est parce qu'un courant de déplacement quelque peu intense ne peut durer longtemps, *dans le même sens* : car la tension de nos ressorts, sans cesse croissante, l'arrêterait bientôt. Il ne peut donc y avoir dans les diélectriques, ni courant continu de longue durée, ni courant alternatif sensible de longue période. Les effets deviendront au contraire observables si l'alternance est très rapide.

3. **Nature de la lumière.** — C'est là d'après Maxwell, l'origine de la lumière ; une onde lumineuse est une suite de courants alternatifs qui se produisent dans les diélectriques et même dans l'air ou le vide interplanétaire et qui changent de sens un quatrillion de fois par seconde. L'induction énorme due à ces alternances fréquentes, produit d'autres courants dans les parties voisines des diélectriques, et c'est ainsi que les ondes lumineuses se propagent de proche en proche. Le calcul montre que la vitesse de propagation est égale au *rapport des unités*, c'est-à-dire à la vitesse de la lumière.

Ces courants alternatifs sont des espèces de vibrations électriques ; mais ces vibrations sont-elles longitudinales comme celles du son ou transversales comme celles de l'éther de Fresnel ? Dans le cas du son, l'air subit des condensations et des raréfactions alternatives. Au contraire, l'éther de Fresnel se comporte dans ses vibrations comme s'il était formé de couches incompressibles susceptibles seulement de glisser l'une sur l'autre. S'il y avait des courants *ouverts*, l'électricité se portant d'un bout à l'autre d'un de ces courants s'accumulerait à l'une des extrémités ; elle se condenserait ou se raréfierait comme l'air, ses vibrations seraient longitudinales. Mais Maxwell

n'admet que des courants fermés ; cette accumulation est impossible, et l'électricité se comporte comme l'éther incompressible de Fresnel, ses vibrations sont transversales.

Ainsi nous retrouvons tous les résultats de la théorie des ondes. Ce n'était pas assez pourtant pour que les physiciens, séduits plutôt que convaincus, se décidassent à adopter les idées de Maxwell ; tout ce qu'on pouvait dire en leur faveur, c'est qu'elles n'étaient en contradiction avec aucun des faits observés, et que c'eût été bien dommage qu'elles ne fussent pas vraies. Mais la confirmation expérimentale manquait : elle devait se faire attendre vingt-cinq ans.

Il fallait trouver entre la théorie ancienne et celle de Maxwell une divergence qui ne fût pas trop délicate pour nos grossiers moyens d'investigation. Il n'y en avait qu'une dont on pût tirer un *experimentum crucis*.

Ce fut là l'œuvre de Hertz, dont nous allons maintenant parler.

CHAPITRE III

LES OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES AVANT HERTZ

1. **Expériences de Feddersen.** — On a produit de très bonne heure des courants alternatifs par des moyens mécaniques, par exemple par l'emploi de commutateurs tournants, de trembleurs, etc. C'était déjà là, en un sens, des oscillations électriques mais dont l'alternance ne pouvait être que très lente.

La décharge d'un condensateur devait fournir un moyen d'obtenir des oscillations beaucoup plus rapides. C'est Feddersen qui le premier démontra expérimentalement que dans certaines circonstances, la décharge de la bouteille de Leyde peut être oscillante.

Feddersen observait l'étincelle produite par la décharge d'une bouteille de Leyde au moyen d'un miroir tournant concave : il a aussi projeté l'image de l'étincelle, au moyen d'un tel miroir, sur une plaque sensible et il a ainsi photographié les divers aspects de l'étincelle.

Il a fait varier la résistance du circuit : avec une faible résistance, il obtenait une décharge oscillante et son dispositif lui permettait de voir comment variait la période, quand il faisait varier la capacité du condensateur ou la self-induction du circuit.

Pour faire varier la capacité, il suffisait de changer le nombre des bouteilles de Leyde : Feddersen a à peu près vérifié la proportionnalité de la période à la racine carrée de la capacité.

Pour faire varier la self-induction, Feddersen changeait la longueur du fil conducteur ; la période est à peu près proportionnelle à la racine de la self-induction, à peu près seulement, car, dans les expériences de Feddersen, la longueur du fil atteignait parfois plusieurs centaines de mètres ; il était suspendu au mur et formait avec lui un véritable condensateur

dont la capacité n'était pas négligeable vis-à-vis de celle du condensateur principal.

Quant au coefficient numérique, Feddersen n'a pu en vérifier la valeur, car il ne connaissait pas bien la valeur de la capacité de ses condensateurs : il n'a pu vérifier que des proportionnalités.

Feddersen a obtenu des périodes de l'ordre de 10^{-4} secondes.

En augmentant graduellement la valeur de la résistance, ce qu'il faisait en intercalant dans le circuit de petits tubes pleins d'acide sulfurique, il a obtenu des décharges continues, puis des décharges intermittentes, ces dernières pour des valeurs très grandes de la résistance, par exemple avec des cordes mouillées.

Il est clair que dans un miroir tournant, une décharge continue doit donner l'image d'un trait de feu continu ; une décharge alternative ou intermittente doit donner une série de taches lumineuses séparées les unes des autres.

Les photographies de décharges oscillantes obtenues par Feddersen présentent un aspect tout particulier. On a une série de point lumineux et obscurs correspondant aux deux extrémités de l'étincelle : mais les points lumineux relatifs à l'une des extrémités correspondent aux points obscurs relatifs à l'autre extrémité, et inversement.

Cela s'explique aisément ; quand une étincelle éclate dans l'air, les particules arrachées à l'électrode positive deviennent incandescentes, il n'en est pas de même des particules négatives , l'extrémité positive de l'étincelle est donc plus lumineuse que l'extrémité négative.

Les photographies de Feddersen prouvent donc que chaque extrémité de l'étincelle est alternativement positive et négative. La décharge n'est donc pas intermittente et toujours de même sens ; elle est oscillante.

2. **Théorie de lord Kelvin.** — Les expériences de Feddersen sont susceptibles d'une explication très simple.

Supposons deux conducteurs (ces deux conducteurs seront dans l'expérience de Feddersen les deux armatures du condensateur) réunis par un fil : s'ils ne sont pas au même potentiel, l'équilibre électrique est rompu : de même que l'équilibre mécanique est dérangé, quand un pendule est écarté de la verticale. Dans un cas comme dans l'autre, l'équilibre tend à se rétablir.

Un courant circule dans le fil et tend à égaliser le potentiel

des deux conducteurs, de même que le pendule se rapproche de la verticale. Mais le pendule ne s'arrêtera pas dans sa position d'équilibre; ayant acquis une certaine vitesse, il va, grâce à son inertie, dépasser cette position. De même, quand nos conducteurs seront déchargés, l'équilibre électrique momentanément rétabli ne se maintiendra pas et sera aussitôt détruit par une cause analogue à l'inertie : cette cause c'est la *self-induction* dont nous avons vu plus haut les analogies avec l'inertie.

En vertu de la self-induction un courant persiste après la disparition de la cause qui l'a fait naître, de même qu'un mobile ne s'arrête pas quand la force qui l'avait mis en mouvement cesse d'agir.

Quand les deux potentiels sont devenus égaux, le courant continuera donc dans le même sens et fera prendre aux deux conducteurs des charges opposées à celles qu'ils avaient d'abord.

Dans ce cas comme dans celui du pendule, la position qui correspond à l'équilibre est dépassée : il faut, pour le rétablir, revenir en arrière

Quand l'équilibre est atteint de nouveau, la même cause le rompt aussitôt et les oscillations se poursuivent sans cesse.

Le calcul montre que la période est proportionnelle à la racine carrée de la capacité des conducteurs ; il suffit donc de diminuer suffisamment cette capacité, ce qui est facile, pour avoir un *pendule électrique* susceptible de produire des courants d'alternance extrêmement rapide.

3. **Comparaisons diverses.** — Je me suis servi, pour faire comprendre la théorie de lord Kelvin, de la comparaison d'un pendule. On peut en employer beaucoup d'autres.

Au lieu d'un pendule, prenons un diapason ; s'il est écarté de sa position d'équilibre, son élasticité tend à l'y ramener; mais entraîné par son inertie, il la dépasse ; son élasticité le ramène en arrière ; et ainsi de suite ; il exécute ainsi une série d'oscillations.

On voit que son élasticité joue le même rôle que la pesanteur dans la théorie du pendule, que la force électrostatique dans la décharge oscillante de la bouteille de Leyde ; que l'inertie du ressort joue le même rôle que l'inertie du pendule ou la self-induction.

Mais il vaut peut-être mieux reprendre la comparaison hydraulique. Supposons deux vases réunis par un tube horizontal :

pour que l'eau y soit en équilibre, il faut que le niveau soit le même dans les deux vases.

Si pour une cause quelconque, cette égalité de niveau est troublée, elle tendra à se rétablir : le niveau baissera dans le vase A où il était d'abord le plus élevé, il montera dans le vase B où il était d'abord le plus bas. L'eau qui est dans le tube se mettra en mouvement allant du vase A au vase B. Mais quand l'égalité du niveau sera rétablie, le mouvement ne s'arrêtera pas, à cause de l'inertie de l'eau contenue dans le tube ; le niveau deviendra plus élevé dans le vase B que dans le vase A. Le même phénomène se reproduira alors en sens contraire, et ainsi de suite.

Nous aurons donc une série d'oscillations ; quelle en sera la période ? Elle sera d'autant plus longue que la section horizontale des vases supposés cylindriques, sera plus forte. Si en effet un litre d'eau se transporte d'un vase dans l'autre, la différence de niveau produite par ce transport sera d'autant plus faible que cette section horizontale sera plus forte. La force motrice sera donc d'autant plus faible et les oscillations d'autant plus lentes.

D'autre part, la période sera d'autant plus longue que le tube sera plus long ; pour transporter un litre d'eau d'un vase à l'autre, il faut mettre en mouvement toute l'eau contenue dans le tube. L'inertie à vaincre est donc d'autant plus forte et les oscillations d'autant plus lentes, que le tube est plus long.

Nous l'avons vu au chapitre premier, la section horizontale du vase correspond à la capacité, la longueur du tube à la self-induction. La période des oscillations électriques sera donc d'autant plus longue que sa capacité et la self-induction seront plus grandes.

4. **Amortissement.** — On sait que les oscillations d'un pendule ne persistent pas indéfiniment ; chaque oscillation est moins ample que celle qui l'a précédée, et, après un certain nombre d'allées et venues de plus en plus petites, le pendule finit par s'arrêter.

Cela est dû au frottement. Or nous avons vu que dans les phénomènes électrodynamiques, il y a une cause qui joue le même rôle que le frottement, c'est la résistance ohmique. Les oscillations électriques doivent donc se ralentir comme les

oscillations pendulaires, elles doivent être amorties, diminuer d'amplitude et finalement s'arrêter.

Le frottement n'exerce sur la période du pendule qu'une influence inappréciable. De même, le plus souvent, la résistance ohmique n'altérera pas sensiblement la période des oscillations électriques ; elles deviendront de plus en plus petites, elles ne seront pas beaucoup moins rapides.

Dans certaines expériences cependant, Feddersen a employé de très grandes résistances; la période, ainsi qu'on pouvait le prévoir, devient alors notablement plus longue.

Le cas extrême est celui où la décharge cesse d'être oscillante.

Supposons un pendule se mouvant dans un milieu très résistant et très visqueux ; au lieu de descendre avec une vitesse croissante, il descendra lentement, arrivera sans vitesse à sa position d'équilibre et ne la dépassera pas. Il n'y a plus d'oscillations.

C'est ainsi qu'on a construit des galvanomètres dits apériodiques ; l'aiguille placée près d'un limbe en cuivre où se développent des courants de Foucault, doit pour se mouvoir surmonter une résistance considérable qui agit comme un véritable frottement. Alors, au lieu d'osciller de part et d'autre de sa position d'équilibre, ce qui rendrait les observations incommodes, elle l'atteint tout doucement et s'y arrête.

Ces exemples mécaniques suffiront pour faire comprendre ce que devient la décharge de la bouteille de Leyde quand la résistance ohmique est très grande.

L'équilibre électrique est atteint lentement et il n'est pas dépassé. La décharge n'est plus oscillante, elle est continue. C'est bien ce qu'ont montré les expériences de Feddersen, qui confirment ainsi entièrement la théorie de lord Kelvin.

Le frottement et les résistances analogues ne sont pas la seule cause de l'amortissement, et toute la force vive des corps oscillants n'est pas transformée en chaleur.

Considérons par exemple un diapason, dont les vibrations diminuent graduellement d'amplitude. Sans doute il se produit des frottements qui échauffent légèrement le diapason ; mais en même temps nous entendons un son ; l'air est donc mis en mouvement et il emprunte sa force vive au diapason. Une partie de cette force vive s'est donc dissipée par une sorte de rayonnement extérieur.

L'énergie des oscillations électriques se perd également de deux manières. La résistance ohmique en transforme une partie en chaleur ; mais nous verrons bientôt qu'une autre portion est rayonnée au dehors, en conservant la forme électrique : c'est là un fait que la théorie de Maxwell permettait de prévoir et qui est contraire à l'ancienne électrodynamique.

Les oscillations électriques subissent donc un double amortissement, par résistance ohmique (analogue au frottement) et par rayonnement.

CHAPITRE IV

L'EXCITATEUR DE HERTZ

1. **Découverte de Hertz**. — Les courants de déplacement prévus par la théorie de Maxwell ne pouvaient, dans les conditions ordinaires, manifester leur existence. Nous l'avons dit, ils ont à surmonter une résistance élastique, qui va sans cesse en croissant quand ils se prolongent ; ils ne peuvent donc être que très faibles ou de très courte durée, *s'ils vont toujours dans le même sens*. Pour que leurs effets soient appréciables, il faut donc qu'ils changent fréquemment de sens, que les alternances soient très rapides. Les courants alternatifs industriels, les oscillations de Feddersen elles-mêmes, sont tout à fait insuffisants pour cet objet.

C'est pour cette raison que les idées de Maxwell ont attendu vingt ans une confirmation expérimentale. C'est à Hertz qu'il était réservé de la leur donner. Ce savant dont la vie fut si courte et si bien remplie, se destina d'abord à la carrière d'architecte : mais il fut bientôt poussé par une vocation irrésistible vers la science pure. Remarqué et encouragé par Helmholtz, il fut nommé Oberlehrer à Calsruhe : c'est là qu'il accomplit les travaux qui ont immortalisé son nom, il passa en un jour de l'obscurité à la gloire. Mais il n'en devait pas jouir longtemps : il n'eut que le temps d'installer son nouveau laboratoire à Bonn ; la maladie l'empêcha d'en utiliser les ressources, et bientôt la mort l'emporta ; il nous laissait cependant, outre sa géniale découverte, des expériences d'une importance capitale sur les rayons cathodiques et un livre très original et très profond sur la philosophie de la mécanique.

2. **Principe de l'excitateur.** — Il s'agissait, comme je l'ai expliqué, d'obtenir des vibrations extrêmement rapides. Il semble, d'après ce que nous avons vu au chapitre III, qu'il suffi-

sait de reprendre les expériences de Feddersen en diminuant les capacités et les self-inductions. C'est ainsi qu'on rend les oscillations d'un pendule plus rapides en diminuant sa longueur.

Mais il ne suffit pas de construire un pendule, il faut encore le mettre en mouvement. Pour cela, il faut qu'une cause quelconque l'écarte de sa position d'équilibre, puis qu'elle cesse d'agir brusquement, je veux dire dans un temps très court par rapport à la durée d'une période ; sans cela il n'oscillera pas.

Si, avec la main, par exemple, on écarte un pendule de la verticale, puis qu'au lieu de le lâcher tout à coup, on laisse le bras se détendre lentement sans desserrer les doigts, le pendule, toujours soutenu, arrivera sans vitesse à sa position d'équilibre et ne la dépassera pas.

En résumé la durée du déclenchement doit être très courte par rapport à celle d'une oscillation : donc, avec des périodes d'un cent millionième de seconde, aucun système de déclenchement mécanique ne pourrait fonctionner, quelque rapide qu'il puisse nous paraître par rapport à nos unités de temps habituelles.

Voici comment Hertz a résolu le problème.

Reprenons notre pendule électrique (voy. p. 22) et pratiquons dans le fil qui joint les deux conducteurs une coupure de quelques millimètres. Cette coupure partage notre appareil en deux moitiés symétriques, que nous mettrons en communication avec les deux pôles d'une bobine de Ruhmkorff. Le courant induit va charger nos deux conducteurs, et la différence de leur potentiel va croître avec une lenteur relative.

D'abord la coupure empêchera les conducteurs de se décharger ; l'air qui s'y trouve joue le rôle d'isolant et maintient notre pendule écarté de sa position d'équilibre.

Mais quand la différence de potentiel sera assez grande, l'étincelle de la bobine éclatera et frayera un chemin à l'électricité accumulée sur les conducteurs. La coupure cessera tout à coup d'isoler, et, par une sorte de déclenchement électrique, notre pendule sera délivré de la cause qui l'empêchait de retourner à l'équilibre. Si des conditions assez complexes, bien étudiées par Hertz, sont remplies, ce déclenchement est assez brusque pour que les oscillations se produisent.

3. **Diverses formes d'excitateurs.** — Ainsi les parties essentielles d'un excitateur sont :

1° Deux conducteurs extrêmes, de capacité relativement grande, auxquels la bobine communique au début des charges de signe contraire, et qui échangent leurs charges à chaque demi-oscillation ;

2° Un conducteur intermédiaire, filiforme, par lequel l'électricité va d'un des conducteurs extrêmes à l'autre ;

3° Un micromètre à étincelles, placé au milieu du conducteur intermédiaire. Il est le siège d'une résistance qui permet d'écarter le pendule électrique de sa position d'équilibre ; cette résistance disparaît ensuite brusquement au moment où l'étincelle éclate, ce qui déclenche le pendule ;

4° Une bobine d'induction dont les deux pôles sont en com-

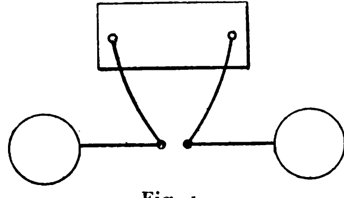


Fig. 1.

munication avec les deux moitiés de l'excitateur et qui leur communique leurs charges initiales. C'est pour ainsi dire le bras qui écarte le pendule de sa position d'équilibre.

Dans le premier excitateur de Hertz (fig. 1), les deux conducteurs extrêmes étaient deux sphères de 15 centimètres de rayon, et le conducteur intermédiaire un fil rectiligne de 150 centimètres.

Hertz a aussi remplacé les deux sphères par deux plaques carrées.

Plions le conducteur intermédiaire en forme de rectangle et

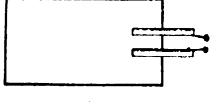


Fig. 2.

rapprochons les deux plaques pour en faire les deux armatures d'un condensateur plan, nous aurons l'excitateur de M. Blondlot (fig. 2), qui s'en est surtout servi comme résonnateur.

On n'aurait qu'à remplacer le condensateur plan par une bouteille de Leyde, et à allonger le fil intermédiaire, pour retomber sur l'appareil de Feddersen, dont les vibrations sont assez lentes pour que le déclenchement puisse se faire mécaniquement.

Supprimons le conducteur intermédiaire, nous aurons l'*excitateur de Lodge* réduit à deux sphères entre lesquelles éclate une étincelle; au lieu des deux sphères, Lodge en met d'ordinaire trois ou quatre ; nous retrouverons cet appareil, sous des dimensions beaucoup plus petites, dans les expériences de Righi et Bose au chapitre XI.

Supprimons au contraire les conducteurs extrêmes : et réduisons la longueur du fil intermédiaire à 30 centimètres, nous aurons *le petit excitateur de Hertz*. La charge, au lieu de se concentrer aux extrémités, est alors répartie sur toute la longueur du fil.

4° **Rôle de l'étincelle.** — On comprend combien il importe que l'étincelle soit « bonne », c'est-à-dire éclate brusquement, dans un temps très court par rapport à la durée de l'oscillation. Mille circonstances influent sur la qualité de l'étincelle. Il faut d'abord qu'elle éclate entre deux boules; elle serait mauvaise si elle éclatait entre deux pointes, ou entre une boule et une pointe.

Il faut ensuite que les surfaces de ces boules soient bien polies. A l'air, elles s'oxydent rapidement, et il faut fréquemment les nettoyer.

Il faut enfin que la distance des boules soit convenable. C'est même là ce qui limite l'amplitude des oscillations. Pour avoir des oscillations amples, il faudrait pouvoir écarter beaucoup le pendule de sa position d'équilibre, c'est-à-dire pouvoir donner aux deux moitiés de l'excitateur des charges importantes avant que l'étincelle n'éclate; or, elle éclatera dès que la différence de potentiel atteindra une certaine valeur d'autant plus grande que la distance explosive sera plus grande. On serait donc conduit à augmenter cette distance; mais on ne peut le faire sans que l'étincelle cesse d'être bonne.

On arrive très vite à distinguer par l'aspect et par le son les bonnes et les mauvaises étincelles.

5. **Influence de la lumière.** — Hertz observa encore un fait très curieux : les étincelles primaire et secondaire paraissaient exercer l'une sur l'autre une action mystérieuse; en mettant

entre les deux un écran, les étincelles secondaires cessaient de se produire. Hertz crut d'abord qu'il y avait là une action électrique, mais reconnut ensuite que ce phénomène était dû à la lumière de l'étincelle.

Pourtant, une plaque de verre, qui laisse passer la lumière, empêchait l'action des étincelles l'une sur l'autre. C'est que les rayons actifs, en cette circonstance, sont les rayons ultra-violets, qui sont arrêtés par le verre : en effet, une plaque de fluorine, qui laisse passer les rayons ultra-violets, laisse aussi subsister l'action des étincelles primaires.

6. **Emploi de l'huile**. — MM. Sarasin et de la Rive ont réalisé un grand progrès, en faisant éclater l'étincelle dans l'huile. Les boules du micromètre ne s'oxydant plus, les nettoyages incessants ne sont plus nécessaires, et les étincelles sont beaucoup plus régulières. Enfin, le potentiel explosif étant plus grand que dans l'air, on peut écarter davantage le pendule électrique avant que l'étincelle produise le déclenchement. L'amplitude des oscillations est donc augmentée.

Toutefois, en télégraphie sans fil, où on emploie des potentiels considérables on a renoncé à l'usage de l'huile, qui est une complication. Cela est possible grâce à la grande capacité des conducteurs, c'est-à-dire aux grandes quantités d'électricité mises en jeu. Les étincelles peuvent dans ces conditions rester bonnes, quoique longues.

7. **Valeur de la longueur d'onde**. — Diverses considérations théoriques permettent de prévoir que le grand excitateur de Hertz, que nous avons décrit plus haut, produit des oscillations dont la fréquence est de 50 000 000 par seconde.

On sait que l'on appelle longueur d'onde le chemin parcouru par la perturbation pendant la durée d'une oscillation; si la vitesse de propagation est la même que celle de la lumière, c'est-à-dire 300 000 kilomètres par seconde, la longueur d'onde sera la cinquante millionième partie de 300 000 kilomètres, c'est-à-dire 6 mètres.

Les mêmes considérations font prévoir que le petit excitateur de Hertz donnera des vibrations 10 fois plus rapides et par conséquent une longueur 10 fois plus petite.

Nous verrons plus loin que ces prévisions théoriques ont été confirmées par la mesure directe des longueurs d'onde.

CHAPITRE V

MOYENS D'OBSERVATION

1. **Principe du résonateur.** — Un excitateur développe dans l'espace environnant des courants de déplacement et des effets d'induction; ou bien encore, il produit par induction une perturbation en un point d'un fil, et cette perturbation se propage ensuite tout le long de ce fil. Il nous reste à voir comment on peut mettre ces effets en évidence.

Pour cela on se sert ordinairement du résonateur. Quand un diapason vibre, ses vibrations se transmettent à l'air environnant, et, si dans le voisinage se trouve un diapason d'accord avec le premier, il entre à son tour en vibration. De même un excitateur électrique développe une perturbation dans le champ qui l'entoure et fait entrer en vibration un second excitateur placé dans ce champ, si les deux périodes de vibrations sont les mêmes. L'excitateur devient ainsi un résonateur.

Mais il y a une grande différence entre la résonance acoustique et la résonance électrique. Un résonateur acoustique répond très bien aux excitations qui sont parfaitement d'accord avec lui. Sa réponse est pratiquement nulle, si peu que les périodes diffèrent. Un résonateur électrique répond bien aux excitations avec lesquelles il est d'accord ; il répond un peu moins bien à celles dont la période est peu différente et assez mal à celles qui sont en désaccord notable avec lui.

Voici la raison de cette différence : les vibrations acoustiques s'amortissent lentement, leur amplitude est sensiblement constante; les vibrations électriques s'amortissent rapidement. C'est pour cette raison que la résonance est moins franche et comme un peu floue.

Un résonateur n'est autre chose qu'un excitateur dans lequel on a supprimé la bobine d'induction devenue inutile; cette bobine ne sert en effet qu'à charger l'excitateur, et ici c'est le

champ extérieur qui doit mettre en mouvement le résonateur.

D'ailleurs, toute forme d'excitateur pourrait être employée comme résonateur. Ordinairement on supprime les deux conducteurs extrêmes et on n'emploie guère que deux types, le *résonateur ouvert* où le fil ou conducteur intermédiaire reste rectiligne, et le *résonateur fermé* où il est recourbé en cercle de façon que ses deux extrémités deviennent très voisines l'une de l'autre.

2. **Fonctionnement du résonateur.** — Quand le son se propage dans un tuyau d'orgue, il se réfléchit à une extrémité, revient en arrière, se réfléchit à l'autre extrémité, revient encore en sens contraire, et ainsi de suite. Toutes ces ondes réfléchies interfèrent entre elles, s'ajoutant si elles sont d'accord, se détruisant dans les cas contraires. C'est ainsi que certains sons sont renforcés et d'autres éteints.

Le mécanisme du résonateur électrique est tout à fait semblable. La perturbation se propageant le long du fil, se réfléchit aux deux extrémités, et l'accumulation de toutes ces ondes réfléchies renforce les vibrations électriques dont la période est convenable.

J'ai expliqué plus haut pourquoi il est nécessaire de munir les excitateurs d'un interrupteur à étincelle qui produit brusquement le déclenchement du pendule électrique. La même raison n'existe plus ici, puisque c'est le champ extérieur qui met le résonateur en branle. Mais il ne suffit pas que le résonateur vibre, il faut que nous sachions qu'il vibre. L'étincelle sert à nous en avertir; au milieu du résonateur ouvert, on conservera donc un interrupteur à étincelles. Les étincelles secondaires produites ainsi dans le résonateur sont beaucoup plus courtes que les étincelles primaires de l'excitateur : elles n'ont que quelques centièmes de millimètre.

Avec le résonateur fermé, on se borne à rapprocher les deux extrémités assez près pour que l'étincelle puisse jaillir entre elles. Quand alors l'amplitude des vibrations devient assez grande, la différence de potentiel entre les deux extrémités peut atteindre une valeur suffisante pour que l'étincelle éclate ; c'est alors seulement qu'on est averti de l'existence des vibrations. C'est comme si de l'eau oscillait dans un vase, et si on ne s'en apercevait qu'au moment où le balancement serait assez fort pour qu'un peu d'eau débordât.

Si les deux extrémités d'un tuyau sonore étaient fermées, la



demi-longueur d'onde serait égale à la longueur totale du tuyau : par analogie, la demi-longueur d'onde de la vibration propre d'un résonateur sera la longueur totale du fil, si les deux extrémités n'ont aucune capacité ; cette extrémité est alors assimilable à l'extrémité fermée d'un tuyau ; car le courant est nul en ce point, que l'électricité ne peut traverser, et où elle ne peut s'accumuler.

Cela cesse d'être vrai, dès que la capacité des extrémités devient sensible, et c'est pour cela que la demi-longueur d'onde d'un résonateur fermé est un peu plus grande que la longueur du fil.

Cela doit nous aider à comprendre le fonctionnement du résonateur ouvert. Soit un fil AD interrompu en son milieu par un interrupteur à étincelles BC. Cet interrupteur est très court, quelques centièmes de millimètre seulement : l'extrémité B de AB et de l'extrémité C de CD forment donc comme les armatures d'un condensateur dont la lame isolante serait très mince et par conséquent la capacité notable ; elle se comporteront donc plutôt comme l'extrémité *ouverte* que comme l'extrémité fermée d'un tuyau sonore.

Si l'étincelle passe, le résonateur AD vibre tout entier à la façon d'un tuyau dont les deux extrémités seraient fermées, et la demi-longueur d'onde est AD. Si l'étincelle ne passe pas, les deux moitiés du résonateur, AB et CD, vibrent séparément, mais à la façon d'un tuyau dont une extrémité serait ouverte et l'autre fermée. La demi-longueur d'onde est donc deux fois AB, c'est-à-dire encore AD.

3. **Divers modes d'emploi de l'étincelle.** — On peut éviter l'emploi du résonateur qui déforme la vibration en en exagérant certaines harmoniques. Supposons que la perturbation se propage le long d'un fil, et que les deux points de ce fil soient rapprochés l'un de l'autre. La perturbation atteindra le premier de ces points avant l'autre, de sorte qu'à un moment, il y aura une différence de potentiel entre ces deux points ; si cette différence est assez grande, une étincelle éclatera. Par ce procédé, et en faisant varier la longueur de fil comprise entre les deux points entre lesquels on fait jaillir l'étincelle, MM. Pérot et Birkeland ont pu réunir des données suffisantes pour déterminer la forme de la perturbation.

Qu'on emploie ou non le résonateur, on comprend aisément

comment l'étincelle se prête aux mesures. Une vis permet d'écarter plus ou moins les deux bornes de l'interrupteur, et on cherche à quelle distance il faut mettre ces bornes pour que les étincelles commencent à éclater.

Le phénomène devient beaucoup plus brillant si l'on se sert d'un tube de Geissler. Un tube à gaz raréfié s'illumine en effet quand il est placé dans le champ alternatif produit par un excitateur.

4. **Procédés thermiques.** — Au lieu d'observer les étincelles on peut étudier l'échauffement produit par les courants oscillatoires, soit dans un résonateur, soit dans le fil le long duquel se propage la perturbation.

Pour étudier l'échauffement des conducteurs, on peut employer différents moyens :

1° Mesurer l'allongement qui en résulte ;

2° Mesurer la variation de leur résistance ;

3° Se servir de pinces thermo-électriques.

I. — La mesure de l'allongement est peu précise, malgré les dispositions ingénieuses qui ont été employées. Aussi n'y insisterons-nous pas, non plus que sur les expériences où on a mis à profit le mouvement de l'air chaud dans un tube entourant le fil conducteur.

II. — La mesure de la variation de la résistance donne des résultats excellents. C'est au moyen du bolomètre qu'on opère : un pont de Wheatstone ordinaire a ses deux branches parcourues par le courant d'une pile ; on fait passer en outre le courant oscillatoire dans une des branches.

Supposons le galvanomètre G au zéro et commençons à faire passer les oscillations dans une partie de la branche AB, par exemple ; la branche AB s'échauffe, sa résistance diminue, l'équilibre est détruit et le galvanomètre dévié.

III. — On fait parcourir au courant alternatif un fil fin, dans le voisinage duquel (à $\frac{1}{10}$ de millimètre environ) on dispose la pince thermo-électrique. Ce procédé est également très sensible.

5. **Procédés mécaniques.** — Les procédés mécaniques, fondés soit sur les attractions électrostatiques, soit sur l'action mutuelle des courants, semblent au premier abord incapables de déceler

les oscillations hertziennes. Ces oscillations sont en effet trop rapides, pour qu'aucun organe mécanique puisse suivre toutes les variations des phénomènes électriques ou magnétiques : tout ce qu'on peut obtenir, c'est la valeur moyenne du phénomène.

Mais un galvanomètre, par exemple, recevant une série d'impulsions alternatives et de sens contraire, resterait en repos, la valeur moyenne du phénomène serait nulle.

De même, si on mettait les quadrants d'un électromètre en communication avec un appareil où se produisent des oscillations et si on portait l'aiguille à un potentiel constant, l'électrisation de l'aiguille conserverait toujours le même signe, celle des quadrants changerait de signe à chaque instant; leur action mutuelle changerait donc de sens, et sa valeur moyenne serait encore nulle.

Aussi pour réaliser une action mécanique, M. Bjerknes s'est servi d'une autre disposition. Il emploie un électromètre à quadrants, auquel on n'a conservé que deux quadrants opposés. Ces quadrants sont mis respectivement en communication avec les deux extrémités d'un résonateur disposé, bien entendu, de façon à ne pas donner d'étincelles. L'aiguille de l'électromètre est isolée.

A un certain moment, l'aiguille va se charger par influence d'électricité positive à une de ses extrémités, d'électricité négative à l'autre; les quadrants exercent sur elle une certaine action. Une demi-période après, le signe de la charge des quadrants a changé, mais l'électrisation par influence de l'aiguille a également changé de sens, de sorte que le sens de l'action n'a pas été changé.

6. **Comparaison des divers procédés.** — Il y a une grande différence entre les procédés fondés sur l'étincelle et les procédés thermiques ou mécaniques.

L'étincelle éclate ou n'éclate pas, et pour qu'elle éclate, il suffit qu'*à un instant quelconque*, le potentiel ait été suffisamment grand. Elle nous renseigne donc sur *l'amplitude maxima de l'oscillation.*

Au contraire les procédés thermiques ou mécaniques nous font connaître des moyennes ; ils nous renseignent sur *l'amplitude moyenne de l'oscillation.*

M. Bjerknes, en employant concurremment les deux sortes

de procédés, a pu mesurer l'amortissement de la vibration propre d'un résonateur.

On conçoit en effet que, plus une oscillation s'amortit vite, plus le rapport de l'amplitude moyenne à l'amplitude maxima est petit. Or, la comparaison des deux procédés nous permet précisément de mesurer ce rapport.

CHAPITRE VI

LE COHÉREUR

1. **Radioconducteurs**. — M. Branly a imaginé un récepteur beaucoup plus sensible qu'il appelle radioconducteur, et qui est fondé sur un principe entièrement différent. L'importance de ses applications m'oblige à y consacrer un chapitre spécial. Le radio-conducteur a reçu également le nom de cohéreur.

Supposons un tube de verre dont la section est assez étroite et qui est rempli de limaille métallique. Chacun des morceaux de limaille est bon conducteur de l'électricité : mais l'électricité rencontre une résistance notable pour passer d'un morceau à l'autre, de sorte que la résistance totale de l'appareil s'exerce presque exclusivement aux points de contact des divers petits morceaux entre eux.

Or, l'expérience prouve que cette résistance diminue considérablement quand l'appareil est exposé aux radiations hertziennes, c'est-à-dire aux forces d'induction qui s'exercent dans le voisinage d'un excitateur de Hertz et qui changent de sens un très grand nombre de fois par seconde.

Je reviendrai plus loin sur l'explication de ce phénomène, pour le moment, je me bornerai à dire que l'on a observé des effets analogues en exposant le radioconducteur, non pas aux radiations hertziennes, mais à d'autres influences d'une nature toute différente mais de caractère périodique et de période très courte, par exemple aux vibrations sonores.

Quoi qu'il en soit, les radiations hertziennes agissent comme si elles rendaient plus intime le contact des diverses particules de limaille. Une secousse ou une élévation de température, suffit ensuite pour rendre au radioconducteur sa résistance primitive.

Supposons donc que dans le circuit d'une pile, on place un radioconducteur exposé aux radiations que produit un excitateur de Hertz. Quand l'excitateur ne fonctionnera pas, le radiocon-

ducteur sera parcouru seulement par le courant continu de la pile. Quand l'excitateur fonctionnera, le radioconducteur sera parcouru d'une part par le courant continu de la pile, d'autre part par des courants alternatifs très rapides dus à l'induction développée par l'excitateur ; mais dans ce dernier cas, les courants alternatifs diminuant la résistance, le courant continu deviendra beaucoup plus intense, ce que le galvanomètre indiquera.

Ordinairement le cohéreur est isolant parce que les contacts des graines de limaille entre eux sont mauvais ; et le courant de la pile ne passe pas. Mais si le cohéreur est frappé par une onde hertzienne, il devient conducteur, et le courant passe. Il suffit ensuite d'un choc léger pour lui faire perdre sa conductibilité et pour faire cesser le courant.

Ainsi, une onde très faible *déclenche*, pour ainsi dire, le courant de la pile, et rien n'empêche de prendre cette pile assez forte pour faire marcher un appareil Morse, soit directement. soit par l'intermédiaire d'un relais ; le courant de la pile décèlera ainsi la présence des ondes.

2. **Théorie du cohéreur.** — Le cohéreur a reçu bien des formes différentes. D'abord on a employé diverses limailles ou *divers* mélange de limailles. Une condition qui semble essentielle, c'est que les métaux employés soient légèrement oxydables ; il est probable que les grains se recouvrent d'une mince couche d'oxyde qui s'oppose au passage du courant. Des limailles de métaux inoxydables le laisseraient toujours passer. Toutefois la couche d'oxyde ne doit pas être trop épaisse. sans quoi le tube resterait isolant même en présence des oscillations hertziennes. C'est pourquoi M. Lodge conseille de sceller le tube et d'y faire le vide quand les métaux ont atteint un degré convenable d'oxydation. On peut obtenir aussi de bons résultats avec de la limaille d'argent, légèrement sulfurée à la surface, la couche de sulfure jouant alors le même rôle que la couche d'oxyde.

On a construit également des cohéreurs à limaille inoxydable, mais en prenant pour les électrodes des métaux oxydables. Il est probable alors que la résistance a lieu au contact de la limaille et des électrodes.

C'est par tâtonnement qu'on est arrivé au mélange le plus avantageux ; celui qu'emploie Marconi comprend 96 pour 100 de limaille de nickel et 4 pour 100 de limaille d'argent.

Les contacts multiples entre des grains de limaille ne sont pas indispensables ; on a pu réaliser des cohéreurs où il n'y a qu'un contact unique ou un petit nombre de contacts entre des pièces métalliques de dimensions sensibles, par exemple de petites billes ou de petits ressorts d'acier appuyés l'un sur l'autre.

On a construit d'autre part des cohéreurs où le contact sensible a lieu entre charbon et métal, ou entre charbon et charbon (comme dans les microphones). Ces cohéreurs jouissent d'une propriété importante : ils sont *autodécohérents ;* c'est-à-dire qu'après le passage de l'onde ils reprennent d'eux-mêmes leur résistance primitive, sans qu'il soit nécessaire de leur faire subir un choc. On conçoit que cette propriété puisse devenir précieuse pour les applications téléphoniques ; si on veut faire en effet de la téléphonie sans fil les signaux à transmettre sont les vibrations sonores, qui, pour les sons aigus, se succèdent très rapidement. Il serait donc impossible, par des moyens mécaniques, de rendre au cohéreur, après chaque vibration, sa résistance perdue.

Mentionnons, pour terminer, des appareils que l'on a appelés, *décohéreurs* et dont la résistance augmente, au lieu de diminuer, sous l'influence des ondes hertziennes. Ces appareils ont reçu diverses formes. La plus remarquable se compose de plaques métalliques superposées. Le contact des deux plaques présente une certaine résistance qui diminue quand les plaques sont mouillées ; mais la résistance primitive reparaît quand les plaques mouillées sont soumises aux ondes électriques. Les décohéreurs n'ont pas toutefois jusqu'ici reçu d'applications pratiques.

3. **Explication des phénomènes.** — Tels sont les faits à expliquer. On a donné au tube à limaille deux noms différents : Lodge l'a appelé *cohéreur* et Branly *radio-conducteur*. Ces deux dénominations correspondent à des idées théoriques très différentes. Branly suppose que les radiations hertziennes modifient le diélectrique qui sépare les grains de limaille. Lodge pense qu'entre ces grains les ondes hertziennes font éclater des étincelles qui percent les couches isolantes d'oxyde, arrachent des particules des grains de limaille et de ces particules forment des ponts qui soudent pour ainsi dire ces grains l'un à l'autre. Ces ponts, une fois formés, subsisteraient jusqu'à ce

qu'un choc les force à s'écrouler ; dans les appareils autodécohérents ils seraient plus fragiles encore et disparaîtraient dès que les radiations cesseraient de passer.

La plupart des physiciens ont adopté l'opinion de Lodge ; car plusieurs expérimentateurs ont pu observer directement sous le microscope la production des étincelles et la formation des ponts. Ils ne s'étaient pas placés, il est vrai, dans des conditions tout à fait identiques à celles de la télégraphie pratique.

Ce qui est plus difficile à expliquer, dans cette manière de voir, c'est le fonctionnement des cohéreurs où les grains de limaille sont noyés dans un diélectrique solide, tel que la paraffine. On suppose que les étincelles creusent dans la paraffine de petits canaux dont les parois se revêtent de poussière métallique. Dans les décohéreurs, elles agiraient en volatilisant de petits ponts métalliques préexistants, ou en réduisant partiellement en vapeur l'eau qui mouille les plaques. Mais tout cela reste très hypothétique.

4. **Fonctionnement du cohéreur.** — Le cohéreur doit être réglé ; pour cela on rapproche plus ou moins les deux électrodes pour faire varier la pression mutuelle des grains de limaille ; si cette pression est trop grande le courant passe toujours ; si elle est trop faible, les ondes hertziennes ne suffisent plus pour lui ouvrir le passage ; mais entre certaines limites la résistance qui est de l'ordre du mégohm devient subitement un million de fois plus petite sous l'influence des radiations et tombe à l'ordre de l'ohm.

Si l'on réfléchit à l'explication de Lodge, l'extrême sensibilité du cohéreur paraîtra moins extraordinaire. Pour qu'il fonctionne, il suffit que l'étincelle éclate et pour cela qu'à *un moment quelconque* la différence de potentiel atteigne une certaine limite (limite d'ailleurs très faible puisque les intervalles des grains de limaille sont microscopiques) ; tout dépend donc de l'ébranlement *maximum*. Or, celui-ci peut être considérable bien que l'énergie totale soit très faible parce que la durée de la perturbation est très courte.

Peu importe que ce maximum ne soit atteint que pendant un instant, car dès que l'étincelle a jailli, les ponts sont formés et livrent passage au courant de la pile locale. L'effet de l'onde persiste donc jusqu'à ce qu'un choc le fasse cesser. Il y a là

quelque chose d'analogue à celle de « persistance des impressions » à laquelle notre rétine doit en partie sa sensibilité.

On comparera le récepteur de Branly au bolomètre décrit plus haut ; dans les deux appareils, les oscillations hertziennes ont pour effet de faire varier la résistance d'un conducteur parcouru par un courant continu ; mais la variation de résistance est due à deux causes très différentes ; dans un cas à l'échauffement du fil, dans l'autre à un contact plus intime entre les particules de limaille.

Le radioconducteur est d'ailleurs infiniment plus sensible ; nous le retrouverons dans les expériences de Bose au chapitre XI ; c'est lui aussi qui a rendu possible la télégraphie sans fil.

A un certain point de vue on peut même dire que le cohéreur est un appareil trop sensible ; il n'admet d'ailleurs pas de nuances ; il fonctionne complètement ou ne fonctionne pas du tout, puisque ce n'est qu'un appareil de déclenchement. Il n'aurait donc pu remplacer le résonateur dans la mesure des longueurs d'onde ou dans les autres expériences que nous avons décrites plus haut.

Si Hertz n'avait connu que le cohéreur, il n'aurait jamais pu mettre en évidence la périodicité des vibrations électriques et mesurer les longueurs d'onde. En revanche pour toutes les applications pratiques, le cohéreur est un détecteur infiniment supérieur à tous les autres.

On s'est servi du radioconducteur pour rechercher si le soleil émet des radiations hertziennes ; le résultat a été négatif. Peut-être ces radiations sont-elles absorbées par l'atmosphère solaire.

Sans doute, l'expérience montre que les gaz à la pression ordinaire sont assez transparents pour ces radiations. Mais en est-il de même pour les gaz très raréfiés ? Nous avons vu qu'un tube de Geissler s'illumine dans un champ où se produisent des oscillations hertziennes. Il ne s'illumine pas sans absorber de l'énergie ; les gaz raréfiés absorbent donc les radiations hertziennes, et il est possible que celles que le soleil pourrait émettre soient absorbées par la partie supérieure des deux atmosphères, où la pression est très faible.

5. **Détecteurs magnétiques**. — Dans ces derniers temps M. Marconi a imaginé un détecteur fondé sur un principe tota-

lement différent. Les ondes hertziennes auraient la propriété de détruire l'hystérésis des aimants. On sait qu'un morceau de fer, placé dans un champ magnétique s'aimante, mais que cette aimantation demande un certain temps pour s'établir. Il en résulte que dans un champ magnétique variable, les variations de l'aimantation sont en retard sur celles du champ qui la produit. C'est ce retard qu'on appelle hystérésis et qui disparaît sous l'action des ondes hertziennes. On peut, en utilisant cette propriété construire un détecteur d'ondes qui est, dit-on, aussi sensible que le cohéreur de Branly.

Supposons en effet que le morceau de fer soit entouré d'une bobine de fil se fermant dans un téléphone. Quand l'aimantation du fer variera, il se formera dans la bobine des courants induits qui circuleront dans le téléphone.

Normalement, si le champ magnétique varie lentement, l'aimantation du fer variera lentement avec un léger retard dû à l'hystérésis, et on n'entendra aucun son dans le téléphone.

Faisons maintenant fonctionner l'excitateur. A chaque interruption du primaire de la bobine de Ruhmkorff, l'excitateur émettra une série de vibrations. Sous l'influence de ces vibrations le fer perdra son hystérésis, et son aimantation rattrappera *brusquement* son retard (tel un baromètre qui avance brusquement quand on frappe dessus). On aura donc autant de variations brusques de l'aimantation que d'interruptions du primaire de la bobine ; et le téléphone émettra un son qui aura par seconde autant de vibrations que e trembleur de cette bobine produira d'interruptions.

CHAPITRE VII

PROPAGATION LE LONG D'UN FIL

1. **Production des perturbations dans un fil.** — Un excitateur de Hertz produit des forces d'induction dans le champ qui l'environne. Si l'on place dans ce champ un long fil métallique, ces forces d'induction développeront dans la partie du fil voisine de l'excitateur des courants alternatifs, c'est-à-dire une perturbation électro-magnétique qui se propagera tout le long du fil.

Pour forcer les perturbations électro-magnétiques à parcourir un fil, on peut employer différents procédés, parmi lesquels nous distinguerons le procédé électrostatique de Hertz et le procédé électro-magnétique de M. Blondlot.

Méthode de Hertz. — Deux plateaux A, B, de grande capacité, remplacent les deux sphères de l'excitateur (fig. 3) : vis-à-vis de

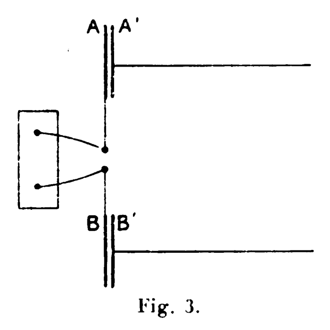


Fig. 3.

ces deux plateaux en sont placés deux autres A', B', au milieu de chacun desquels est attaché un fil d'une certaine longueur. On augmente ainsi les capacités des plateaux A et B, en formant avec chacun d'eux une sorte de condensateur.

Si l'excitateur entre en mouvement, l'un des plateaux, A par exemple, se charge positivement, B négativement ; au bout d'une

demi-oscillation, les charges changent de signes, et le même fait se reproduit au bout de temps égaux.

Les plateaux A et B se chargent par influence d'électricités de signes contraires à celles des plateaux A et B, et les fils deviennent le siège d'un phénomène ondulatoire dont la période est celle de l'excitateur.

Méthode de M. Blondlot. — L'excitateur a la forme d'un fil recourbé aboutissant à une sorte de condensateur (fig. 4) :

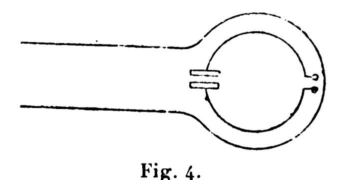


Fig. 4.

autour de ce premier fil, s'en trouve un second qui se continue par un fil rectiligne de grande longueur. On isole les deux fils circulaires l'un de l'autre en les entourant d'une gaine de caoutchouc.

Quand les vibrations se produisent, l'excitateur est le siège de courants périodiques qui donnent lieu dans le deuxième fil à des courants induits de même période.

2. **Mode de propagation.** — La propagation d'une perturbation hertzienne, c'est-à-dire un courant alternatif de haute fréquence, est-elle assimilable de tous points à la propagation d'un courant continu, tel que celui que fournirait une pile ?

Une première différence a frappé depuis longtemps les expérimentateurs : un courant continu se répartit uniformément dans toute la section du conducteur.

Cela n'est déjà plus vrai pour les courants alternatifs de faible fréquence employés dans l'industrie électrique. Dans l'axe du conducteur, le courant est presque nul, son intensité est beaucoup plus grande à la surface. Tout se passe comme si le courant superficiel protégeait la partie centrale du conducteur contre les actions extérieures par les forces d'induction qu'il développe.

Avec les oscillations hertziennes dont la période est beaucoup plus courte, on doit s'attendre à voir le même phénomène exagéré. Il ne doit plus y avoir de courant en dehors d'une couche super-

ficielle extrêmement mince. Bjerknes a vérifié cette prévision par un procédé ingénieux.

J'ai dit (page 36) comment ce savant mesure l'amortissement d'un résonateur. Cet amortissement dépend de la matière dont le fil est fait. Il n'est pas le même pour un résonateur en fer et pour un résonateur en cuivre.

Bjerknes recouvre, par électrolyse, le résonateur de fer d'une couche de cuivre et le résonateur de cuivre d'une couche de fer. Dès que l'épaisseur de cette couche atteint un centième de millimètre, le résonateur de fer se comporte comme s'il était en cuivre et le résonateur de cuivre comme s'il était en fer.

Cela montre que les courants restent confinés dans une couche dont l'épaisseur est de l'ordre du centième de millimètre. Cet effet est conforme à la fois à l'ancienne théorie et à celle de Maxwell.

Mais la théorie de Maxwell permet de prévoir une autre particularité qui malheureusement, ne se prête guère à une vérification expérimentale directe. Les courants alternatifs qui circulent dans un fil, produisent des forces d'induction dans l'air qui entoure ce fil.

D'après Maxwell, ces forces d'induction doivent donner naissance dans l'air lui-même à des courants de déplacement.

On aurait donc, avec les courants continus, des courants de conduction dans toute la masse du conducteur et rien dans l'air environnant ; on aurait au contraire avec les courants alternatifs de haute fréquence, des courants de conduction dans la partie superficielle du conducteur, rien dans la partie centrale, et des courants de déplacement dans l'air.

3. **Vitesse de propagation et diffusion.** — Kirchoff a cherché à calculer la vitesse de propagation d'une perturbation électrique quelconque. Il a supposé d'abord que le conducteur était parfait, et que le courant, ne rencontrant pas de résistance ohmique, n'avait à surmonter que la self-induction qui joue un rôle analogue à l'inertie. Dans ces conditions, il a démontré que la vitesse de propagation est égale au rapport des unités, c'est-à-dire à la vitesse de la lumière, 300 000 kilomètres par seconde.

De plus, la propagation se fait régulièrement : si la perturbation se trouve à l'origine confinée dans une certaine région du fil, longue d'un mètre par exemple, au bout d'un cent millième de seconde, la tête de l'onde aura avancé de trois kilomètres,

et la queue de l'onde aura également avancé de trois kilomètres; de sorte que la distance de la tête à la queue n'aura pas changé et que la perturbation n'occupera encore sur le fil qu'une longueur d'un mètre.

Mais ces conditions théoriques ne sont pas réalisées avec les conducteurs naturels qui opposent aux courants, outre la self-induction, une résistance ohmique analogue au frottement. Qu'arrive-t-il alors ? La tête de l'onde avancera toujours avec la même vitesse, celle de la lumière ; mais la queue avancera beaucoup moins vite, de sorte que la longueur occupée par la perturbation deviendra de plus en plus grande. Ainsi s'allonge sur une route une colonne qui laisse derrière elle des traînards. C'est ce qu'on appelle la *diffusion du courant.*

La diffusion est d'autant moins à craindre que la période des oscillations est plus courte. Pratiquement, on peut dire qu'avec les oscillations hertziennes, il n'y a plus de diffusion, et que tous les conducteurs se comportent comme s'ils étaient parfaits.

Non que leur résistance ohmique devienne plus petite, elle est au contraire plus grande, puisque le courant n'utilise que la partie la plus superficielle de la section du conducteur. Mais la self-induction, qui dépend des variations du courant, croît beaucoup plus vite encore puisque ces variations sont extrêmement rapides, et la résistance ohmique devient négligeable devant la self-induction.

Telles sont les conséquences que la théorie ancienne et celle de Maxwell permettent de prévoir; car sur ce point, les deux théories sont d'accord. Nous allons voir que ces prévisions sont confirmées par l'expérience.

4. **Expériences de MM. Fizeau et Gounelle.** — Les expériences de MM. Fizeau et Gounelle ont été faites en 1850, par une méthode fondée sur le même principe que le procédé célèbre de Fizeau pour la mesure de la vitesse de la lumière.

Une roue de bois, qui tournait avec une grande rapidité avait sa circonférence divisée en trente-six secteurs alternativement en platine et en bois. Deux fils, terminés par un balai métallique qui frottait sur la circonférence de cette roue pouvaient ainsi être alternativement mis en communication métallique ou isolés l'un de l'autre. Il y avait aussi trois paires de balais disposés comme je vais l'expliquer.

L'un des pôles de la pile était en communication avec la terre et l'autre avec un premier fil AB terminé par le balai B. Il y avait encore le fil de ligne CDEE' allant du balai C à l'extrémité D de la ligne et revenant ensuite aux deux balais E et E', enfin, deux fils F'G, FG', mettaient en communication les balais F et F' avec la terre.

Les secteurs de la roue pouvaient mettre en communication B avec C, E avec F, E' avec F', et la disposition était telle que les communications BC et EF étaient ouvertes et fermées en même temps, et que la communication E'F' était au contraire fermée quand les deux autres étaient ouvertes et inversement.

Voyons d'abord ce qui devrait se passer si l'électricité se propageait avec une vitesse parfaitement définie comme la lumière et le son. Appelons période l'intervalle de temps qui s'écoule entre le moment où un des balais entre en contact avec un des secteurs et celui où ce contact cesse, c'est-à-dire la trente-sixième partie de la durée d'un tour complet de la roue. Cette période sera d'autant plus courte que la rotation sera plus rapide.

Supposons que la durée T de la propagation le long de la ligne CDE soit égale à un nombre pair de périodes. L'électricité venue de la pile passera de B en C au moment où la communication BC sera ouverte, elle parcourra la ligne et arrivera au bout d'un temps T en E et en E'. A ce moment la communication EF sera ouverte et la communication E'F' fermée, et le courant passera dans le fil FG.

Si, au contraire, T était égal à un nombre impair de périodes l'électricité en arrivant en E et en E' trouverait EF fermée et E'F' ouverte et le courant passerait dans le fil F'G'.

Ainsi la vitesse de rotation pourrait être telle que le courant passât tout entier dans FG, ou tout entier dans F'G'. Pour des vitesses intermédiaires, le courant se partagerait en proportions inégales entre les deux fils.

Les deux fils FG et F'G', s'enroulaient autour d'un galvanomètre différentiel, sur lequel ils exerçaient des actions de sens contraire, et l'observation de ce galvanomètre permettait de discerner si l'intensité moyenne dans FG l'emportait sur l'intensité moyenne dans F'G'.

On pouvait ainsi voir quelle devrait être la vitesse de rotation pour que T fût égal à un multiple donné de la période. On

pouvait donc mesurer T, et par conséquent, la vitesse de propagation.

Diverses circonstances, sur lesquelles nous reviendrons plus loin, venaient compliquer les phénomènes, et il en résultait que le courant dans FG (ou dans F′G′) ne s'annulait jamais et présentait seulement une alternance de maxima et de minima dont les premiers était seuls observables.

Les observations de MM. Fizeau et Gounelle ont donné 100 000 kilomètres pour la vitesse dans le fer et 180 000 kilomètres pour la vitesse dans le cuivre.

5. **Diffusion du courant.** — J'ai dit tout à l'heure que le courant FG ne s'annule jamais, ainsi que cela devrait arriver si l'électricité se propageait avec une vitesse parfaitement déterminée. Tout se passe comme si la perturbation s'estompait, en se propageant, de façon à occuper plus d'étendue sur le fil à l'arrivée qu'au départ. Ce phénomène mis hors de doute par les expériences de Fizeau a été appelé par ce physicien la diffusion du courant.

J'ai exposé plus haut (page 47) les raisons qui pouvaient faire prévoir ce phénomène. Il est aisé d'en comprendre les conséquences. Tout doit, en somme, se passer comme si une partie de l'électricité se mouvait avec la vitesse même de la lumière, pendant que le reste suivrait avec une vitesse moindre et d'ailleurs variable. Nous aurions alors une forte tête de colonne s'avançant avec une vitesse de 300 000 kilomètres, mais en laissant en arrière des traînards qui s'éparpilleraient sur la route.

La méthode de Fizeau mesure non pas la vitesse maximum, c'est-à-dire celle de la tête de colonne, mais la vitesse moyenne qui doit être notablement moindre. C'est ce qui explique pourquoi la vitesse observée est très inférieure à 300 000 kilomètres.

La vitesse moyenne dans le fer est moindre que dans le cuivre pour deux raisons : 1° parce que le fer est magnétique, ce qui augmente la self-induction à cause de l'aimantation transversale ; 2° parce que sa résistance spécifique est plus grande que celle du cuivre, ce qui augmente l'influence de la diffusion.

Les expériences de Fizeau ne sont donc pas en désaccord avec la théorie.

6. **Expériences de M. Blondlot.** — La discussion qui précède montre suffisamment combien la propagation d'un courant continu, ou bien intermittent ou alternatif de basse fréquence, diffère de la propagation des perturbations hertziennes.

Ces dernières, en effet, sont de très courte durée et formées d'oscillations dont la période est excessivement courte.

On a donc lieu de penser que l'influence de la diffusion sera négligeable, le résidu laissé en arrière très faible, et la vitesse moyenne extrêmement voisine de la vitesse du front de l'onde, c'est-à-dire de 300 000 kilomètres.

On ne pouvait donc rien conclure, en ce qui concerne ces perturbations, des expériences que nous venons de relater, et de nouvelles études étaient nécessaires : c'est ce qui a décidé M. Blondlot à entreprendre les expériences suivantes :

Son appareil se compose de deux bouteilles de Leyde symétriques F et F′ de petite capacité. Les armatures intérieures A et A′ sont mises en communication par un fil, interrompu en son milieu par un micromètre à étincelles. Les deux bornes de ce micromètre sont reliées à une bobine de Ruhmkorff. L'ensemble de ces armatures A et A′, du fil qui les joint et du micromètre, constitue un véritable excitateur que j'appelle E.

L'armature extérieure de chacune des deux bouteilles F et F′ est divisée en deux parties isolées. J'appelle B et C les deux parties de l'armature extérieure de F, B′ et C′ celles de l'armature extérieure de F′.

B et B′ sont mises en communication de deux manières :

1° Par une corde mouillée;

2° Par un fil métallique court, interrompu en son milieu par un micromètre à étincelles dont les bornes sont formées par deux pointes métalliques P et P′.

De même C et C′ sont mises en communication de deux manières :

1° Par une corde mouillée;

2° Par un fil de ligne. Ce fil va d'abord de l'armature C au point D, à l'extrémité de la ligne, puis revient de D à la pointe P dont j'ai parlé plus haut; après avoir traversé le micromètre, l'électricité doit aller de la pointe P′ au point D′ à l'extrémité de la ligne, puis revenir du point D′ à l'armature C′. Les poteaux télégraphiques portent ainsi quatre fils, CD, DP, P′D′, D′C′, et l'électricité pour aller de C en C′ par ce chemin, en traversant

le micromètre, doit parcourir quatre fois toute la longueur de la ligne, deux fois à l'aller, deux fois au retour.

On peut donc aller de B en B' ou de C en C' par deux chemins, par une corde mouillée de grande résistance, ou par un chemin métallique, mais interrompu par un micromètre.

Si les variations de potentiel sont lentes, l'électricité passera tout entière par une corde mouillée; car la différence de potentiel entre les deux points P et P' ne deviendra jamais assez grande pour que l'étincelle éclate, et le micromètre restera isolant.

Si, au contraire, ces variations sont rapides, l'étincelle éclatera, frayera un chemin à l'électricité, à travers le micromètre P P', la quasi totalité de l'électricité passera par le chemin métallique, et il ne passera par la corde mouillée qu'une quantité négligeable à cause de la grande résistance de cette corde.

Voici comment fonctionnera l'appareil. La bobine de Ruhmkorff chargera les armatures intérieures A et A', par exemple A positivement et A' négativement. Les armatures B et C se chargeront négativement par influence; les armatures B' et C' se chargeront positivement. Il faut donc qu'une certaine quantité d'électricité aille de B en B' et de C en C'; mais comme les variations sont relativement lentes, cette électricité passera par les cordes mouillées.

A un certain moment, l'étincelle de l'excitateur E éclatera. Cette étincelle sera oscillante, comme son aspect le montre suffisamment. Les armatures A et A' vont se décharger brusquement, de sorte que les électricités accumulées sur les armatures B, C, B' et C' vont devenir libres brusquement et simultanément. L'électricité va donc repasser de B' en B et de C' en C, mais cette fois en suivant le chemin métallique, car les variations sont brusques.

Deux étincelles éclateront dans le micromètre PP', qui est la partie commune aux deux chemins métalliques BB' et CC'. La première étincelle éclatera au moment où la perturbation partie de B arrivera en P, la seconde au moment où la perturbation partie de C arrivera en P. Comme le chemin BC est très court, l'intervalle de temps qui s'écoulera entre les deux étincelles sera égal au temps que la perturbation mettra à parcourir le chemin CDP. C'est cette longueur CDP que j'appelle la longueur de la ligne; elle est le double du fil d'aller CD, qui va à l'extrémité de la ligne, et la moitié du chemin total CDPP'D'C'.

L'intervalle de temps entre les deux étincelles était apprécié

à l'aide d'un miroir tournant qui envoyait la lumière des étincelles sur une plaque sensible; on n'avait plus qu'à mesurer la distance des deux images obtenues sur cette plaque.

Les premières expériences où la longueur de la ligne était d'un peu plus de 1 kilomètre, ont donné en moyenne une vitesse de 293 000 kilomètres; avec une longueur de ligne de 1 800 mètres, on a obtenu ensuite en moyenne une vitesse de 298 000 kilomètres.

CHAPITRE VIII

MESURE DES LONGUEURS D'ONDE ET RÉSONANCE MULTIPLE

1. **Ondes stationnaires**. — Les expériences que nous venons de relater montrent que la vitesse de propagation le long d'un fil est la même que celle de la lumière. Pour avoir le nombre de vibrations par seconde, il nous reste à mesurer la longueur d'onde et à diviser par cette longueur le chemin parcouru en une seconde, c'est-à-dire 300 000 kilomètres.

Pour cela, Hertz a cherché à se servir du phénomène des ondes stationnaires. Supposons une perturbation périodique se propageant le long d'un fil ; arrivée à l'extrémité de ce fil, elle va se réfléchir et reviendra en arrière. Il va donc falloir composer la perturbation directe et la perturbation réfléchie. Deux perturbations périodiques s'ajoutent si elles sont de même phase, c'est-à-dire si les courants alternatifs dus à ces deux perturbations sont positifs en même temps et négatifs en même temps ; elles se retranchent si elles sont de phases contraires, c'est-à-dire si les courants dus à l'une sont positifs au moment où ceux qui sont dus à l'autre sont négatifs, ou inversment.

Les deux perturbations, directe et réfléchie, sont de même phase et s'ajoutent, si leur différence de marche est d'un nombre entier de longueurs d'onde; les points correspondants du fil, où l'action est maximum, s'appellent des ventres.

Ces deux perturbations sont de phases opposées et se retranchent, si leur différence de marche est d'un nombre impair de demi-longueurs d'onde; les points correspondants du fil, où l'action est nulle, s'appellent des nœuds.

La distance de deux nœuds consécutifs est égale à la moitié de la longueur d'onde.

Soient en effet A et B ces deux nœuds, en A, la différence de marche doit être d'un nombre impair de demi-longueurs

d'onde, par exemple de $2n+1$ demi-longueurs d'onde. L'onde directe passera en B après avoir passé en A ; l'onde réfléchie, au contraire, passera en B avant de passer en A. Quand on passe du point A au point B, le chemin parcouru par l'onde directe a donc augmenté de AB, tandis que le chemin parcouru par l'onde réfléchie a diminué de AB. Ainsi la différence de marche a diminué de 2 AB. Mais comme le point B est un nœud, cette différence de marche doit être encore un nombre impair de demi-longueurs d'onde, soit $2n-1$ demi-longueurs. Il faut donc que 2 AB soit précisément égal à une longueur d'onde.

Tel est le phénomène des ondes stationnaires, comme le comprenait d'abord Hertz, qui espérait en tirer un moyen simple pour mesurer les longueurs d'onde.

Malheureusement comme nous allons le voir, les choses sont un peu plus compliquées.

La réflexion à l'extrémité du fil peut se faire de différentes manières. Si le fil se termine sans aboutir à une capacité, l'électricité ne peut s'accumuler à l'extrémité, le courant doit donc s'y annuler, l'extrémité est un nœud.

C'est le contraire, si le fil aboutit à une capacité considérable, si par exemple les deux fils parallèles représentés sur les figures des pages 44 et 45, aboutissent aux deux armatures d'un condensateur ; l'extrémité est alors un ventre.

On peut encore réunir les extrémités de ces deux fils parallèles. La perturbation qui a parcouru l'un des fils dans le sens direct, reviendra par l'autre fil qu'elle suivra dans le sens rétrograde ; en interférant avec la perturbation qui suit ce second fil dans le sens direct, elle produira encore des ondes stationnaires.

2. **Résonance multiple.** — J'ai dit (page 32) qu'un résonateur répond bien à un excitateur avec lequel il est parfaitement d'accord ; mais qu'il répond encore, quoique moins bien à un excitateur dont la période est différente.

Il en résulte que l'on peut opérer, quoique moins facilement, avec un excitateur et un résonateur dont les périodes diffèrent notablement. C'est ce qu'ont fait MM. Sarasin et de la Rive.

Ils ont constaté une loi inattendue, qu'ils ont appelée loi de la résonance multiple. L'internœud, ou distance de deux nœuds, qui d'après ce qui précède doit mesurer la demi-longueur d'onde, change quand on change le résonateur en conservant le même

excitateur ; il ne change pas quand on change l'excitateur en conservant le même résonateur.

Ce que l'on mesure, c'est donc quelque chose qui est propre au résonateur ; l'internœud est donc la demi-longueur d'onde de la vibration propre du résonateur et non la demi-longueur d'onde de la vibration de l'excitateur.

Voici l'explication proposée par MM. Sarasin et de la Rive. La perturbation émanée de l'excitateur est complexe et résulte de la superposition d'une infinité de vibrations simples, que l'on peut appeler ses composantes. Telle une source lumineuse qui produit non pas une lumière monochromatique, mais une lumière blanche donnant un spectre continu.

Chaque résonateur ne répond qu'à l'une de ces composantes; quand on se sert d'un résonateur, on mesure la longueur d'onde de cette composante, et les autres composantes n'ont aucune influence. En d'autres termes, on mesure la longueur d'onde de la vibration propre du résonateur.

C'est ainsi qu'en acoustique, un son complexe formé de plusieurs harmoniques peut être analysé par un résonateur qui ne laisse subsister que l'une de ces harmoniques.

3. **Autre explication.** — Une autre explication est possible. Les vibrations émises par un excitateur doivent s'amortir très rapidement ; car leur énergie est promptement transformée en chaleur par la résistance de l'étincelle, ou dissipée par le rayonnement.

Qu'arrive-t-il alors ? J'ai dit plus haut que l'onde refléchie s'ajoute à l'onde directe ou s'en retranche et que c'est cette combinaison des deux ondes qui produit les ondes stationnaires. Mais, considérons un point A un peu éloigné de l'extrémité du fil ; pendant le temps que met la perturbation à aller du point A à cette extrémité, puis après la réflexion, à revenir de l'extrémité au point A, pendant ce temps, dis-je, l'onde directe a eu le temps de s'éteindre ; ainsi, quand l'onde réfléchie arrive, l'onde directe a cessé ; il ne peut donc y avoir combinaison, il ne peut y avoir d'onde stationnaire.

Il n'y aura donc d'onde stationnaire proprement dite que dans le voisinage de l'extrémité du fil.

Et cependant, *en se servant d'un résonateur*, on observe des alternances de nœuds et de ventres dans toutes les parties du fil. Comment cela se fait-il ?

Pour l'expliquer, il suffit de supposer que les vibrations du résonateur s'amortissent beaucoup moins vite que celles de l'excitateur. Quand l'onde directe passe, elle met le résonateur en vibration ; quand l'onde réfléchie revient, l'onde directe s'est éteinte dans le fil, mais le résonateur n'a pas cessé de vibrer. Il recevra alors une seconde impulsion ; cette seconde impulsion va-t-elle accroître l'amplitude de ces vibrations ou la diminuer ?

Faisons une comparaison.

Un pendule reçoit une première impulsion qui le fait se mouvoir par exemple de gauche à droite. Après une demi-oscillation, il va se mouvoir de droite à gauche ; après une oscillation entière, il ira de nouveau de gauche à droite. En général, après un nombre entier d'oscillations, il ira de gauche à droite ; après un nombre impair de demi-oscillations, il ira de droite à gauche.

Supposons qu'il reçoive une seconde impulsion *dans le même sens* : si cette impulsion se produit après un nombre entier d'oscillations, au moment où le pendule va de gauche à droite, elle tendra à augmenter sa vitesse ; si elle se produit après un nombre impair de demi-oscillations, au moment où le pendule va de droite à gauche, elle tendra à la diminuer.

De même, avec le résonateur ; cet appareil reçoit une première impulsion au moment du passage de l'onde directe, une seconde au moment du passage de l'onde réfléchie. Si, entre ces deux impulsions, il s'est produit un nombre entier d'oscillations du résonateur, c'est-à-dire si la différence de marche des deux ondes est un nombre entier de longueurs d'onde *du résonateur,* les effets des deux impulsions se contrarient et on observe un ventre. Si, au contraire, la différence de marche est un nombre impair de demi-longueurs d'onde du résonateur, les effets des deux impulsions se contrarient et on observe un nœud.

En résumé, la distance de deux nœuds doit être la demi-longueur d'onde du résonateur. La longueur d'onde de l'excitateur n'intervient pas.

Quelques remarques avant d'aller plus loin au sujet de cette seconde explication.

J'ai dit plus haut ce qui arrive, quand les deux impulsions reçues par le pendule sont dans le même sens ; les effets seraient renversés, si elles étaient de sens contraires. Or, il est aisé de se rendre compte que l'impulsion due à l'onde directe et l'impulsion due à l'onde réfléchie pourront être, soit de même

sens, soit de sens contraires, d'une part selon la façon dont s'est faite la réflexion (cf. page 45), d'autre part suivant la position du résonateur. Ainsi s'expliquent, de la façon la plus simple, les expériences de M. Turpain qui ont semblé paradoxales à quelques personnes et dont la symétrie suffit à rendre compte.

En second lieu, on peut se demander pourquoi l'appareil formé de deux longs fils n'est pas assimilable à un grand résonateur et répond indifféremment aux excitations de toutes les périodes. S'il n'y avait pas d'amortissement, les ondes réfléchies, interférant comme je l'ai expliqué page 30, produiraient des effets de résonance. Mais il n'en est pas ainsi ; quand une des ondes réfléchies atteint un point du fil, l'onde directe s'est éteinte depuis longtemps, et il n'y a pas d'interférence.

4. **Expériences de Garbasso et Zehnder.** — Telles sont les deux explications entre lesquelles l'expérience peut seule prononcer.

M. Zehnder a cherché à observer directement le spectre continu prévu par la théorie MM. Sarasin et de la Rive ; il s'est servi d'une sorte de réseau qui doit séparer les diverses composantes de la vibration complexe émise par l'excitateur, de la même façon que le réseau d'ordinaire employé en optique sépare les diverses couleurs qui composent la lumière blanche.

M. Garbasso a cherché par une disposition compliquée que je ne puis décrire ici, à imiter la dispersion que produit un prisme en agissant sur la lumière blanche.

Ces divers expérimentateurs ont obtenu les résultats qu'ils avaient prévus, ce qui paraîtrait confirmer l'explication de MM. Sarasin et de la Rive.

Ces expériences semblent concluantes ; elles ne le sont pas. On démontre, en effet, par un calcul simple, qu'une vibration amortie se comporte comme une vibration complexe qui posséderait un spectre continu où *les intensités seraient distribuées suivant une loi particulière.*

Il ne suffit donc pas de démontrer que la vibration émise par l'excitateur se comporte comme si elle possédait un spectre continu ; il faut encore faire voir que, dans ce spectre, les intensités des diverses composantes ne varient pas conformément à cette loi particulière.

5. **Mesure de l'amortissement.** — Loin de là, une série d'expériences, que je vais maintenant relater, ont fait voir, non seu-

lement que les intensités varient conformément à cette loi, mais que la seconde explication est la vraie.

Il fallait d'abord vérifier l'hypothèse fondamentale sur laquelle repose cette seconde explication, à savoir que l'amortissement de l'excitateur est beaucoup plus rapide que celui du résonateur.

J'ai dit plus haut, page 36, comment M. Bjerknes mesure l'amortissement d'un résonateur.

Pour un excitateur, il a obtenu comme « décrément logarithmique » 0,26, tandis qu'il obtenait pour deux résonateurs 0,002 et 0,034. Ce qui veut dire que, pour régler l'amplitude à la dixième partie de sa valeur initiale, il suffit de 9 oscillations dans le cas de l'excitateur, tandis qu'il en faut plus de 60 et plus de 1 000 dans le cas d'un et de deux résonateurs.

La vibration d'un excitateur s'amortit donc beaucoup plus vite que celle d'un résonateur.

6. **Expériences de Strindberg**. — Pour compléter la confirmation, il fallait montrer que si, par un artifice quelconque, on arrive à rendre l'amortissement du résonateur plus rapide que celui de l'excitateur, les phénomènes sont inverses, c'est-à-dire que l'internœud ne dépend plus du résonateur, mais seulement de l'excitateur.

C'est ce qu'ont vérifié, indépendamment l'un de l'autre, M. Décombe en France et M. Nils Strindberg en Suède.

Je ne puis écrire ce nom sans rappeler que M. Strindberg, non content de servir la science par son intelligence, a voulu la servir également par son courage. Il a accompagné M. Andrée dans son périlleux voyage aéronautique dans les régions polaires et y a trouvé la mort.

Pour réaliser l'expérience, il s'agissait de diminuer l'amortissement de l'excitateur et d'augmenter celui du résonateur.

Pour diminuer l'amortissement de l'excitateur, il fallait d'abord supprimer la perte d'énergie due à l'étincelle. Cela semble irréalisable, puisque, sans interrupteur, le déclenchement du pendule électrique n'est pas possible et ce pendule ne peut pas entrer en branle. M. Strindberg s'en tire par un artifice simple. Un premier excitateur est muni d'un interrupteur à étincelles, il agit par induction sur un second excitateur tout à fait semblable, mais qui, étant mis en mouvement par l'action du premier, peut être dépourvu d'interrupteur. Ce second exci-

tateur aura même période que le premier, mais un amortissement moindre. C'est lui qui produit ensuite une perturbation dans les fils, par la disposition de M. Blondlot (voir p. 45, fig. 4).

Il est aisé d'autre part d'augmenter la résistance du résonateur, et comme cette résistance est un frottement, elle a pour effet d'amortir plus rapidement ses oscillations.

7. **Expériences de MM. Pérot et Jones.** — Il y a d'autres procédés de vérification plus directs. Nous avons vu que, malgré l'amortissement, il y a encore des ondes stationnaires proprement dites, mais seulement dans le voisinage de l'extrémité du fil. L'étude de ces ondes secondaires peut nous faire connaître la forme de la perturbation produite par l'excitateur. Mais pour que cette étude soit possible, il faut ne pas *employer l'intermédiaire d'un résonateur* : nous avons vu en effet que les résonateurs produisent des effets secondaires qui subsistent seuls loin de l'extrémité du fil et se traduisent alors par le phénomène de la « résonance multiple ». Ces effets pertubateurs doivent être supprimés.

On s'est servi pour cela des divers procédés, indépendants du résonateur, que j'ai décrits pages 34, 35, et 36.

M. Pérot s'est servi de l'étincelle sans résonateur.

M. Jones a employé un procédé thermique, fondé sur l'emploi de la pince thermo-électrique.

M. Bjerknes a employé un procédé mécanique.

Toutes ces expériences ont confirmé la seconde explication.

8. **Expériences de M. Décombe.** — Ces méthodes n'ont pas paru encore assez directes à M. Décombe. Ce savant a voulu étudier la perturbation au moment même où elle est produite par l'excitateur ; on pouvait se demander, en effet, si elle n'est pas altérée, quand elle passe de l'excitateur aux fils, ou en se propageant le long de ces fils.

Pour cela, M. Décombe a cherché à photographier l'étincelle de l'excitateur en se servant d'un miroir tournant. C'est ce qu'avait fait Feddersen (Cf. chapitre III), mais avec des oscillations beaucoup moins fréquentes. Avec les vibrations hertziennes, les difficultés étaient bien plus grandes ; elles auraient même été insurmontables avec l'appareil de Hertz lui-même (90 000 000 de vibrations par seconde). M. Décombe a dû se contenter d'un excitateur qui donnait 5 000 000 vibrations, tandis

que les appareils de Feddersen en donnaient seulement de 20 000 à 400 000.

Les diverses étincelles qui correspondent aux oscillations successives forment leur image sur la plaque sensible en des points différents à cause du mouvement du miroir. Il faut que ce mouvement soit assez rapide, pour que les divers traits qui correspondent à ces étincelles soient séparés les uns des autres. Le miroir de M. Décombe faisait 500 tours par seconde.

Pour que la plaque fût impressionnée, malgré la courte durée de l'action de la lumière, M. Décombe a dû pousser à l'extrême chacun des moyens dont nous disposons et mettre toutes les chances de son côté.

Il a fallu employer un excitateur à faible amortissement, faire éclater l'étincelle dans l'huile où elle est plus courte et plus lumineuse, se servir d'un bain de développement particulièrement énergique. Il a fallu combiner l'appareil optique de façon que les traits lumineux soient à la fois très étroits et très intenses.

Tous les détails de cette expérience font le plus grand honneur à l'ingéniosité de leur auteur. Le succès a couronné ses efforts, et il a obtenu des images dont l'étude révèle l'existence d'une vibration simple amortie, conformément à la seconde explication.

L'excitateur, il est vrai, n'est pas celui de Hertz, et il donne des oscillations dix fois moins fréquentes ; mais la différence est assez faible pour qu'on puisse conclure de l'un à l'autre.

D'après M. Swyngedauw, une autre cause viendrait, à titre secondaire, contribuer à produire la résonance multiple. Nous avons vu que la résistance ohmique n'influe pas sensiblement sur la période ; son influence n'est pourtant pas tout à fait nulle, et elle tend à allonger la période. Or, l'étincelle est d'autant moins résistante qu'elle est plus chaude, et comme elle va constamment en s'échauffant, la période doit décroître légèrement des premières oscillations aux dernières. Les expériences de M. Décombe n'ont pas confirmé cette manière de voir ; mais depuis, M. Tissot, opérant aussi avec un miroir tournant et avec les appareils de télégraphie sans fil dont nous parlerons plus loin, a observé une diminution de période analogue à celle que prévoyait M. Swyngedauw. Il semble donc que dans certaines circonstances, le phénomène prévu par ce savant puisse devenir sensible.

CHAPITRE IX

PROPAGATION DANS L'AIR

1. **L'experimentum crucis.** — Toutes les expériences que j'ai relatées jusqu'ici sont incapables de décider entre la théorie ancienne et celle de Maxwell.

Les deux théories font prévoir que les perturbations électriques doivent se propager le long d'un fil conducteur avec une vitesse égale à celle de la lumière. Toutes deux rendent compte du caractère oscillatoire de la décharge d'une bouteille de Leyde et par conséquent des oscillations qui se produisent dans un excitateur. Toutes deux font prévoir que ces oscillations doivent produire dans le champ environnant des forces électromotrices d'induction et par conséquent ébranler un résonateur placé dans ce champ.

Mais, *d'après l'ancienne théorie, la propagation des effets d'induction doit être instantanée.* Si, en effet, il n'y a pas de courants de déplacement, si par conséquent il n'y a *rien* au point de vue électrique dans le diélectrique qui sépare le fil inducteur du fil induit, il faut bien admettre que l'effet se produit dans le fil induit au même moment que la cause dans le fil inducteur ; car dans l'intervalle, s'il y en avait un, la cause aurait cessé dans le fil inducteur, l'effet ne se serait pas encore produit dans le fil induit, et il n'y aurait *rien* dans le diélectrique qui est entre ces deux fils, il n'y aurait donc rien nulle part. La propagation instantanée de l'induction est donc une conséquence à laquelle l'ancienne théorie ne peut échapper.

D'après la théorie de Maxwell, l'induction doit se propager dans l'air avec la même vitesse que le long d'un fil, c'est-à-dire avec la vitesse de la lumière.

Voilà donc l'experimentum crucis ; il faut voir avec quelle vitesse se propagent par induction les perturbations magnétiques à travers l'air.

Si cette vitesse est infinie, il faudra conserver l'ancienne

théorie ; si cette vitesse est celle de la lumière, il faudra adopter la théorie de Maxwell.

Quel est donc le moyen de mesurer cette vitesse ? Nous ne pouvons le faire directement. Mais nous avons vu que la longueur d'onde est, par définition, le chemin parcouru pendant la durée d'une vibration, et j'ai montré également comment on peut mesurer la longueur d'onde le long d'un fil.

Si la longueur d'onde dans l'air est la même que la longueur d'onde le long d'un fil, c'est que la vitesse de propagation dans l'air est la même que le long d'un fil. C'est donc que la théorie de Maxwell est vraie.

Le problème est donc ramené à la mesure de la longueur d'onde dans l'air.

Pour faire cette mesure, on peut employer le même procédé que dans le cas de la propagation le long d'un fil.

Nous avons vu qu'on faisait interférer l'onde directe transmise le long d'un fil avec l'onde réfléchie à l'extrémité de ce fil. On fera interférer de même l'onde directe transmise à travers l'air, avec l'onde réfléchie sur un miroir plan métallique. Ce miroir sera disposé de telle sorte que la radiation directe vienne le frapper normalement et que, par conséquent, l'onde réfléchie chemine en sens inverse de l'onde directe.

Dans ces conditions, on obtiendrait des ondes stationnaires proprement dites, si la vibration de l'excitateur n'avait pas d'amortissement. Mais à cause de cet amortissement et pour les mêmes raisons que j'ai développées au chapitre VII, le phénomène de la résonance multiple se produira. Je n'ai pas à répéter ici la discussion des pages 55 et 56. Tout se passera exactement de la même manière.

Si on promène un résonateur entre l'excitateur et le miroir, on constatera une succession de nœuds et de ventres ; les nœuds seront les points où le résonateur ne répond pas à l'excitateur, et les ventres seront ceux où l'intensité du phénomène est maxima.

L'internœud, ou distance de deux nœuds, est égal à la demi-longueur d'onde *du résonateur* dans l'air, de même que, dans le cas de la propagation le long d'un fil, l'internœud était égale à la demi-longueur d'onde *du résonateur* le long d'un fil. Si donc l'internœud dans l'air est égal à l'internœud le long d'un fil, c'est que la longueur d'onde dans l'air est la même que le long d'un fil, c'est que la théorie de Maxwell est vraie.

2. **Expériences de Karlsruhe.** — Tel est l'experimentum crucis que Hertz tenta pour la première fois à Karlsruhe. Il n'obtint pas d'abord le résultat attendu.

Le long d'un fil, son résonateur donnait un internœud de 3 mètres ; dans l'air il semblait donner un internœud de $4^m,50$, soit 9 mètres de longueur d'onde. Sans doute cette expérience paraissait condamner l'ancienne électro-dynamique qui aurait exigé une longueur d'onde infinie, mais elle paraissait condamner également la théorie de Maxwel qui aurait exigé une longueur d'onde de 6 mètres.

Cet insuccès est resté mal expliqué ; il est probable que le miroir était trop petit par rapport à la longueur d'onde et que la diffraction venait troubler les phénomènes. Peut-être aussi, la réflexion des ondes sur les murs de la salle, ou les colonnes de fonte qui partageaient cette salle en trois travées, exerçaient-elles un effet perturbateur.

Quoi qu'il en soit, les excitateurs plus petits conduisaient à d'autres résultats et donnaient le même internœud dans l'air et le long d'un fil ; sans doute la longueur d'onde ayant diminué n'était plus trop grande par rapport aux dimensions du miroir.

3. **Expériences de Genève.** — La question cependant n'était pas tranchée, et la maladie ne permettait pas à Hertz de recommencer ses expériences. MM. Sarasin et de la Rive les reprirent alors avec des précautions suffisantes pour éliminer toutes les causes d'erreur.

Leur miroir avait 8 mètres sur 16, et ils ont opéré dans une salle très grande et bien dégagée. Les résultats ont été aussi nets avec le résonateur de 75 centimètres (ayant même longueur d'onde que le grand excitateur de Hertz), qu'avec les résonateurs plus petits. Ces résultats doivent donc être regardés comme définitifs.

Conformément à la théorie de Maxwell, l'internœud est le même dans l'air et le long d'un fil.

4. **Emploi du petit excitateur.** — L'expérience peut être répétée plus facilement avec le petit excitateur de Hertz formé, comme je l'ai dit (p. 27), d'une sorte de court bâton métallique interrompu en son milieu.

On sait qu'on se sert des miroirs paraboliques pour rassembler

en un faisceau de rayons parallèles la lumière émanée d'une source lumineuse de petites dimensions. C'est ce qu'on appelle un projeteur ou réflecteur parabolique.

On peut faire à peu près de même pour les radiations produites par un excitateur. Seulement les dimensions de l'excitateur sont comparables à celles du miroir, de sorte que l'excitateur est plutôt assimilable à une ligne lumineuse qu'à un point lumineux.

Par conséquent au lieu de donner au miroir la forme d'un paraboloïde de révolution et de placer la source au foyer, on lui donne la forme d'un cylindre parabolique et on place l'excitateur suivant la ligne focale. On obtient ainsi un faisceau parallèle de rayons de force électrique.

On peut de même placer le résonateur, qui est tout à fait pareil à l'excitateur, suivant la ligne focale d'un second miroir parabolique. Ce miroir concentre les rayons parallèles sur le résonateur.

Toutefois, dans les expériences d'interférence que je viens de décrire, il convient de supprimer ce second miroir, qui ferait écran et protégerait le résonateur contre l'onde réfléchie.

5. **Nature des radiations**. — Le champ qui environne un excitateur est parcouru par des radiations électromagnétiques : la théorie permet de prévoir les lois de leur distribution, et les expériences les ont d'ailleurs confirmées, au moins dans leurs traits généraux qui sont les seuls que nos moyens d'investigation nous permettent d'atteindre.

Ces lois sont assez complexes, et, pour en simplifier l'énoncé, je ne considérerai que les points du champ très éloignés de l'excitateur.

Considérons donc une sphère de très grand rayon ayant pour centre le milieu de l'excitateur. En chaque point de cette sphère, nous avons une force électromotrice qui à chaque oscillation varie en s'annulant deux fois et change deux fois de sens, mais en conservant la même direction ; nous avons également une force magnétique qui subit des variations analogues.

Quelle sera la direction de ces deux vibrations, l'une électrique, l'autre magnétique ?

Traçons sur la sphère un système de méridiens et de parallèles, comme sur un globe terrestre dont les deux pôles seraient les points où la sphère est percée par l'axe de l'excitateur prolongé.

La force électrique sera tangente au méridien, la force magnétique au parallèle. Les deux vibrations sont donc perpendiculaires entre elles ; elles sont toutes deux perpendiculaires au rayon de la sphère ; c'est-à-dire à la direction de la propagation qui correspond à ce qu'est en optique la direction du rayon lumineux. *Ces deux vibrations sont donc transversales comme les vibrations lumineuses.*

L'amplitude de ces vibrations varie en raison inverse de la distance à l'excitateur : l'intensité varie donc en raison inverse du carré de cette distance.

La vibration a, comme nous venons de le voir, une direction constante, elle est donc assimilable aux vibrations de la lumière polarisée, et non à celles de la lumière naturelle dont la direction varie sans cesse, tout en restant perpendiculaire au rayon lumineux.

Une question se pose encore ; qu'est-ce qui correspond à ce qu'on appelle en optique le plan de polarisation ? Est-ce le plan perpendiculaire à la vibration électrique ? Est-ce le plan perpendiculaire à la vibration magnétique ? Nous verrons au chapitre XI comment on a pu reconnaître que c'est la première de ces deux hypothèses qui est la vraie.

Autre différence avec la lumière émise par une source lumineuse ordinaire : l'intensité n'est pas la même dans toutes les directions ; elle est maxima à l'équateur, nulle aux pôles (en reprenant le réseau de méridiens et de parallèles que nous avions supposé tracé sur notre sphère).

Sauf ces différences, le mode de propagation d'une perturbation électro-magnétique à travers l'air est le même que celui de la lumière. Dans le cas de la propagation le long d'un fil, nous avions aussi les courants de déplacement, mais ces courants n'étaient sensibles que dans l'air qui se trouvait dans le voisinage immédiat du fil. Au lieu de se disperser dans toutes les directions, la perturbation se propageait dans une direction unique ; il en résultait que son intensité se conservait, au lieu de s'affaiblir conformément à la loi du carré des distances.

CHAPITRE X

PROPAGATION DANS LES DIÉLECTRIQUES

1. **Relation de Maxwell.** — Quand dans un condensateur, on remplace la lame d'air isolante par une lame formée d'une autre substance isolante, on constate que la capacité du condensateur se trouve multipliée par un coefficient que l'on appelle le pouvoir inducteur de cette substance. La théorie exige que la vitesse de propagation des ondes électriques dans un diélectrique soit en raison inverse de la racine carrée du pouvoir inducteur de ce diélectrique.

D'autre part, la vitesse de la lumière dans un milieu transparent est en raison inverse de l'indice de réfraction. Donc le pouvoir inducteur devrait être égal au carré de cet indice. C'est la relation théorique de Maxwell.

Elle se vérifie mal, sauf pour le soufre. Cela peut s'expliquer de deux manières : ou bien l'indice de réfraction pour les ondes très longues telles que les ondes électriques, n'est pas le même que l'indice de réfraction optique ; cela n'aurait rien d'étonnant, puisque nous savons que les diverses radiations sont inégalement réfrangibles, et que l'indice du rouge est différent de celui du violet.

Ou bien le carré de l'indice de réfraction électrique est lui-même différent du pouvoir inducteur mesuré par des méthodes statiques dans un champ non variable, ce qui s'expliquerait par divers effets secondaires tels que les charges résiduelles.

D'où la nécessité de mesurer le pouvoir inducteur par deux sortes de méthodes ; les méthodes dynamiques fondées sur l'emploi des oscillations électriques et qui nous donneront l'indice de réfraction électrique ; et les méthodes statiques, dans un champ constant.

2. **Méthodes dynamiques**. — La vitesse de propagation est la même dans l'air et le long d'un fil métallique tendu dans l'air. De même, la vitesse de propagation à travers un diélectrique doit être égale à la vitesse de propagation le long d'un fil plongé dans un diélectrique. Il suffira donc de mesurer cette dernière.

Nous avons vu comment on mesure la longueur d'onde d'une oscillation électrique, en recherchant la distance des nœuds sur un fil à l'aide d'un résonateur (voir page 44). Si le fil est plongé dans un diélectrique, la vitesse de propagation est diminuée ; comme la période est restée la même, la longueur d'onde et la distance des nœuds ont diminué dans le même rapport ; il est donc aisé de mesurer ce rapport, qui est l'inverse de l'indice de réfraction électrique.

Supposons d'autre part que le résonateur dont on se sert pour l'exploration, soit formé d'un condensateur dont les armatures sont réunies par un fil (condensateur de Blondlot). Si on place entre les deux armatures une lame d'une substance isolante, la capacité du résonateur est multipliée par le pouvoir inducteur : la période de la vibration à laquelle répond le résonateur se trouve donc augmentée, ainsi par conséquent que la distance des nœuds.

Si le fil le long duquel l'oscillation électrique se propage, et le résonateur avec son condensateur sont plongés dans un même diélectrique, les deux effets doivent se compenser exactement, la distance des nœuds ne doit pas changer. C'est en effet ce qu'on constate.

Ces méthodes de mesure de l'indice électrique sont analogues à ce qu'est en optique le réfractomètre interférentiel. Mais on peut aussi faire réfracter les rayons électriques à travers un prisme diélectrique ou mieux se servir de la réflexion totale.

3. **Méthodes statiques**. — Pour mesurer dans un champ constant un pouvoir inducteur, il faut savoir comparer deux capacités ; pour cela on peut :

1° Décharger un condensateur à travers un fil et, à l'aide du *galvanomètre balistique*, mesurer la quantité d'électricité qui s'écoule ;

2° Charger et décharger un condensateur un grand nombre de fois par seconde et comparer le courant intermittent ainsi produit à un courant continu de résistance donnée (*Méthode de Maxwell*) ;

3° Mettre deux condensateurs en série et vérifier l'égalité de leur capacité, en montrant que le potentiel de l'armature moyenne est moyenne arithmétique entre les potentiels des armatures extrêmes (*Méthode de Gordon*) ;

4° Mesurer l'*attraction* de deux sphères électrisées plongées dans un diélectrique ;

5° Opposer deux électromètres dont les paires de quadrants correspondantes et les aiguilles sont respectivement en communication métallique et qui sont plongés, l'un dans un diélectrique, l'autre dans l'air (*Électromètre différentiel*) ;

6° Étudier la déviation des lignes de force produite dans un champ électrostatique par l'introduction d'un prisme diélectrique (*Méthode des surfaces équipotentielles de Pérot*).

4. **Résultats.** — Toutes ces méthodes donnent des résultats très discordants.

Pour la *résine*, on a trouvé les nombres suivants pour le pouvoir inducteur que je désignerai par ε :

Carré de l'indice optique	2
Par les surfaces équipotentielles	2,1
Avec les oscillations hertziennes	2,12
Par le galvanomètre balistique	2,03
Par une autre méthode statique.	2.88
Par la méthode d'attraction.	5,44

Pour l'alcool, l'eau et la glace, nous allons rencontrer des divergences encore plus considérables.

Alcool. — 1° Les méthodes statiques ont donné pour $\sqrt{\varepsilon}$ des nombres voisins de 4,9, c'est-à-dire bien différents de l'indice optique ;

2° Cependant *M. Stchegtiœf,* employant la méthode de Gordon avec les oscillations produites par une bobine de Ruhmkorff, a trouvé pour $\sqrt{\varepsilon}$ un nombre voisin de l'indice optique ;

3° Les méthodes fondées sur l'emploi des oscillations hertziennes ont donné une valeur voisine de 4,9.

Eau. — 1° *M. Gouy,* par la méthode de l'attraction, a trouvé :

$$\varepsilon = 80.$$

La valeur de ε varie, bien entendu, avec les impuretés qui sont contenues dans l'eau et qui la rendent plus ou moins conductrice ;

80 est la valeur vers laquelle tend ε quand la conductibilité de l'eau tend vers 0.

M. Cohn a mesuré ε en cherchant la longueur d'onde dans un fil plongé dans l'eau. Il a trouvé que ε dépend de la conductibilité de l'eau et de la température. Ses nombres sont voisins de celui indiqué par M. Gouy.

Un seul expérimentateur a trouvé pour ε un nombre voisin du carré de l'indice optique, $\varepsilon = 1,75$.

Glace. — Une méthode statique a donné :

$$\varepsilon = 78.$$

nombre voisin de celui trouvé par M. Gouy pour l'eau.

M. Blondlot, en employant les oscillations hertziennes, a trouvé au contraire :

$$\varepsilon = 2,5$$

et *M. Pérot*, par la même méthode, a obtenu un nombre voisin du précédent.

On voit qu'il y a ici une différence énorme entre le nombre de MM. Blondlot et Pérot, d'une part, et le nombre 78, d'autre part.

5. **Corps conducteurs.** — Les corps transparents pour la lumière sont en général mauvais conducteurs ; les métaux au contraire sont très conducteurs et très opaques. Il n'y a rien là de paradoxal. Les diélectriques opposent aux ondes électriques (nous l'avons vu au chapitre II) une résistance élastique qui restitue la force vive qui leur est communiquée ; ils laissent donc passer les ondulations. Les conducteurs au contraire opposent une résistance visqueuse qui détruit la force vive pour la transformer en chaleur; ils absorbent donc les ondes électriques et la lumière.

En effet, on a reconnu que les métaux arrêtent comme un écran les ondulations électriques ; ils ne sont qu'un écran imparfait pour les oscillations à très longue période ; mais leur opacité est déjà presque absolue pour les oscillations hertziennes. Les expériences citées plus haut de M. Bjerknes (page 46) montrent que ces radiations ne peuvent pénétrer dans un métal à une profondeur supérieure au centième de millimètre.

Cependant M. Bose, dont nous décrirons plus loin l'appareil si sensible, a cru observer que ces radiations traversaient les métaux. Mais M. Branly a montré récemment que les enve-

loppes métalliques sont impénétrables, même avec les vibrations très rapides obtenues par M. Bose, *pourvu que ces enveloppes soient absolument closes.* Seulement la plus petite ouverture suffit pour que des diffractions se produisent et affectent le récepteur très sensible de M. Bose.

La sensibilité du cohéreur est donc telle qu'elle met en évidence des ondes diffractées *dans toutes les parties de l'ombre géométrique* et pas seulement sur le bord de cette ombre.

·Il faut se rappeler cela pour comprendre comment, en télégraphie sans fil, les ondes hertziennes peuvent contourner des obstacles qui nous paraissent énormes.

6. **Électrolytes.** — Ainsi tout corps conducteur est opaque ; tout corps isolant est transparent. Cette règle admet d'apparentes exceptions.

Certains corps, comme l'ébonite, sont isolants sans être transparents. Mais on constate qu'opaques pour la lumière visible, ils laissent passer les ondes hertziennes.

Il n'y a pas plus lieu de s'en étonner que de voir la lumière rouge traverser le verre rouge qui arrête la lumière verte. D'ailleurs ces corps, transparents pour les ondes électriques de longue période, doivent naturellement se comporter comme des diélectriques dans un champ statique où la période doit être regardée comme infinie.

Au contraire certains liquides, comme l'eau salée ou acidulée, sont conducteurs pour l'électricité et transparents pour la lumière. C'est que ces liquides, que les courants décomposent et qu'on nomme électrolytes, ont une conductibilité bien différente de celle des métaux.

Les molécules de l'électrolyte sont décomposés en « ions ». L'électricité est *transportée* d'une électrode à l'autre par ces ions, qui cheminent à travers le liquide. L'énergie électrique n'est donc pas transformée en chaleur comme dans les métaux mais en énergie chimique. Sans doute, ce processus, lié au mouvement assez lent des ions, n'a pas le temps de s'exercer si la vibration est aussi rapide que celle de la lumière. En fait, les électrolytes sont déjà assez transparents pour les ondes hertziennes.

CHAPITRE XI

PRODUCTION DES VIBRATIONS TRÈS RAPIDES ET TRÈS LENTES

1. **Ondes très courtes**. — Avec l'excitateur de Blondlot, on obtient des longueurs d'onde de 30 mètres; avec le grand excitateur de Hertz des longueurs d'onde de 6 mètres, avec le petit excitateur de Hertz des ondes de 60 centimètres. En d'autres termes on obtient :

Avec l'excitateur de Blondlot.	10 000 000
Avec le grand excitateur de Hertz . . .	50 000 000
Avec le petit — . . .	500 000 000

vibrations par seconde.

On ne s'est pas arrêté là ; le savant physicien italien M. Righi, et après lui, le jeune professeur hindou, M. Jagadis Chunder Bose ont construit des appareils qui permettent d'aller beaucoup plus loin.

Théoriquement, il suffisait pour cela de diminuer les dimensions de l'appareil. Mais on affaiblissait en même temps les oscillations, et il fallait imaginer des récepteurs assez sensibles pour les déceler.

2. **Excitateur de Righi.**— Cet excitateur se compose de deux sphères en cuivre A et B (fig. 5), fixées au centre de deux disques en bois, en verre ou en ébonite : ces deux disques forment les deux bases d'une sorte de récipient cylindrique, beaucoup plus large que haut, dont les parois latérales sont flexibles. L'un des disques est percé d'un petit trou qui permet de remplir le récipient d'huile de vaseline.

Diverses dispositions permettent, grâce à la flexibilité des parois latérales du répicient, de faire varier et de régler la distance des deux sphères.

L'étincelle éclate entre les deux sphères comme dans l'excita-

teur de Lodge; mais grâce aux petites dimensions de ces sphères, la longueur d'onde est très petite.

L'étincelle éclate dans l'huile, disposition dont nous avons plus haut expliqué les avantages. C'est grâce à cet artifice, que les oscillations, malgré la petitesse de l'appareil, ont pu conserver une intensité suffisante : nous avons vu en effet que

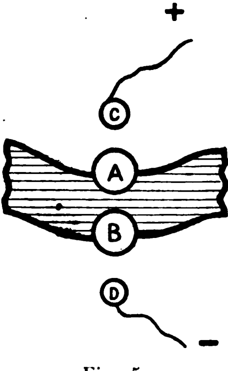


Fig. 5.

l'emploi de l'huile renforce les oscillations, en même temps qu'il rend les étincelles plus régulières.

Pour amorcer l'excitateur, Righi se sert, non d'une bobine de Ruhmkorff, mais d'une machine statique de Holtz, qui a été d'ailleurs également employée avec les excitateurs de Hertz.

Il importe d'observer que les deux sphères A et B ne sont pas directement reliées aux deux pôles de la machine de Holtz ; ces deux pôles sont reliés métalliquement à deux autres sphères C et D ; la sphère C est placée à petite distance de la sphère A, et la sphère D tout près de la sphère B. Nous aurons donc trois étincelles qui éclateront, la première entre C et A, la seconde entre A et B, la troisième entre B et D. La première et la troisième éclateront dans l'air, et la seconde dans l'huile.

C'est la seconde étincelle qui a le caractère oscillatoire. Les deux autres qui ont lieu dans l'air ne servent qu'à charger les deux sphères A et B. Quand elles ont communiqué à ces deux sphères des charges suffisantes, l'étincelle AB éclate dans l'huile et les oscillations commencent.

Il importe de régler la longueur de ces trois étincelles ; Righi donnait à l'étincelle centrale environ 1 millimètre et aux deux

étincelles extrêmes 2 centimètres. Le diamètre des deux sphères A et B était d'environ 4 centimètres. La longueur d'onde obtenue était d'environ 10 centimètres, soit 3 000 000 000 vibrations par seconde.

Avec des sphères de 8 millimètres de diamètre, M. Righi a obtenu des vibrations quatre fois plus rapides encore.

3. **Résonateurs.** — Malgré les perfectionnements introduits par Righi dans la construction de son excitateur, les effets sont encore très faibles, et il faut pour les déceler des résonateurs d'une sensibilité toute spéciale.

Deux remarques ont guidé le savant italien dans la conception de son résonateur : d'abord les étincelles sont beaucoup plus longues, pour une même différence de potentiel, quand elles éclatent à la surface d'un corps isolant que quand elles éclatent dans l'air libre. En second lieu, les effets électro-magnétiques se propageant seulement à la surface des métaux, on peut sans inconvénient réduire l'épaisseur de la partie métallique des résonateurs.

Righi dépose donc par électrolyse une couche mince d'argent à la surface d'une lame de verre ; cette couche a la forme d'un rectangle notablement plus long que large. Au milieu de ce rectangle, on coupe la couche d'argent par un trait de diamant : l'argenture est ainsi interrompue par un trait dont la largeur est de quelques millièmes de millimètres. C'est à travers ce trait que l'étincelle éclate. On voit qu'elle jaillira pour de très faibles différences de potentiel, puisque l'intervalle à franchir est très petit, et puisque l'étincelle éclate à la surface du verre.

Les étincelles sont observées à l'aide d'un petit microscope.

Le résonateur de Righi fonctionne à la manière des résonateurs rectilignes de Hertz.

Les rayons de force électrique émanés de l'excitateur sont rendus parallèles par un miroir en forme de cylindre parabolique ; un second miroir de même forme les concentre ensuite sur le résonateur.

Cet appareil très sensible se prête facilement aux mesures. En effet, on peut faire tourner le résonateur : l'action est maximum quand le résonateur est parallèle à l'excitateur, je veux dire à la droite qui joint les centres des deux sphères A et B. Elle est nulle quand le résonateur est perpendiculaire à l'excitateur. Dans les autres positions elle prend des valeurs inter-

médiaires. On voit alors quelle orientation il faut donner au résonateur pour que l'on commence à apercevoir des étincelles.

4. **Excitateur de Bose**. — M. Jagadis Chunder Bose a obtenu des vibrations plus rapides encore. Son excitateur se compose de trois sphères métalliques A, B et C, les deux sphères A et C sont reliées aux pôles d'une bobine de Ruhmkorff; la sphère centrale B est isolée. Deux étincelles éclatent entre A et B, et entre B et C. C'est encore une des formes de l'excitateur de Lodge.

Les étincelles éclatent dans l'air. Pour qu'elles conservent néanmoins assez longtemps le caractère oscillatoire, il faut que les électrodes ne s'altèrent pas ; M. Bose se sert donc, non de sphères en cuivre, mais de sphères en platine.

Au lieu d'actionner sa bobine avec un trembleur, M. Bose emploie un interrupteur à main ; chaque action de la main lui donne donc une série unique d'oscillations décroissantes et non pas une suite ininterrompue d'étincelles qui useraient rapidement les électrodes.

Grâce à ces précautions, les étincelles restent oscillatoires, et l'on n'a pas besoin de nettoyages et polissages fréquents.

Les effets sont faibles, mais M. Bose compte uniquement pour les déceler sur la sensibilité de son récepteur. Il tient moins d'ailleurs à l'intensité de l'action qu'à sa régularité et à sa constance qui seule peut rendre les mesures possibles. Des oscillations trop fortes seraient même à ses yeux un inconvénient, car il craint que la réflexion, la diffraction ne produisent des radiations secondaires, capables d'agir sur le récepteur et de troubler les observations.

La pile et la bobine sont enfermées dans une double enveloppe métallique presque entièrement close et ne peuvent exercer ainsi à l'extérieur aucune action perturbatrice. Sur la boîte est monté le tube qui contient l'excitateur. Les radiations émanées de cet excitateur sont rendues parallèles à l'aide d'une lentille cylindrique de soufre ou d'ébonite.

On obtient ainsi des longueurs d'onde de 6 millimètres, ce qui correspond à

$$50\,000\,000\,000$$

vibrations par seconde. Des vibrations 10 000 fois plus rapides suffiraient pour impressionner la rétine (elles correspondraient à la couleur orangée du spectre) ; on se trouve, dit M. Bose, à

treize octaves de la lumière visible. On a pu réaliser un pinceau de rayons électriques parallèles dont la section avait un ou deux centimètres carrés.

5. **Récepteur de Bose.** — Le récepteur est fondé sur le principe du radio-conducteur de Branly. Ce radio-conducteur est un instrument d'une merveilleuse sensibilité, mais il est un peu capricieux dans ses indications. De temps en temps, il devient si extraordinairement sensible que le galvanomètre est dévié sans cause apparente ; quelquefois aussi au moment où il semble marcher admirablement, sa sensibilité disparaît subitement.

Sans doute certaines particules viennent en contact trop intime, ou bien les surfaces de contact ont perdu leur sensibilité par la fatigue due à une action prolongée.

M. Bose a donc modifié le radio-conducteur primitif. Des fils fins d'acier sont tordus en spirales. On creuse une étroite rainure dans un bloc d'ébonite et on la remplit avec des spirales qui forment une simple couche ; chaque spirale touche la spirale suivante en un point bien défini, et on a ainsi un millier de contacts. Les spirales sont placées entre deux pièces de bronze, l'une fixe et l'autre susceptible de glisser. Ces pièces sont en communication métallique avec une pile.

Le courant de cette pile arrive ainsi par la spirale supérieure, traverse toutes les spirales en passant de l'une à l'autre par les contacts et sort par la spirale inférieure.

La résistance présentée par ces contacts est diminuée toutes les fois que les radiations électro-magnétiques tombent sur le récepteur.

La pression qui s'exerce aux différents points de contact est réglée à l'aide d'une vis qui appuie sur la première spirale ; elle est uniforme puisque chaque spirale la transmet à la suivante.

Tous les points de contact se trouvent sur une ligne droite sur laquelle on peut concentrer les radiations à l'aide d'une lentille cylindrique.

Quand ces radiations agissent, la résistance totale de l'appareil diminue, le courant qui le traverse devient plus intense, et ces variations d'intensité sont indiquées par un galvanomètre.

La sensibilité de cet appareil est exquise ; il répond à toutes les radiations dans l'intervalle d'une octave. On le rend sensible à diverses sortes de radiations, en faisant varier la force électromotrice qui engendre le courant qui traverse le récepteur.

L'appareil est enfermé dans une enveloppe métallique ne présentant qu'une ouverture linéaire et étroite. Il est donc protégé contre toutes les radiations, sauf celles qui sont concentrées sur cette ouverture.

6. **Appareils de Tesla.** — Les ondes dont nous venons de parler sont beaucoup plus courtes que celles qui sont produites par les excitateurs ordinaires de Hertz. On en a réalisé aussi de beaucoup plus longues ; nous verrons plus loin que ce sont ces ondes longues que l'on utilise en télégraphie sans fil.

D'un autre côté, un Américain M. Tesla, a fait toute une série d'inventions pour réaliser des courants de très haute fréquence ; après avoir essayé différentes combinaisons mécaniques, il s'est arrêté à un appareil qui se compose d'un véritable excitateur de Hertz accompagné d'un résonateur. Seulement la capacité de l'excitateur étant grande, la longueur d'onde est notablement plus grande que celles qu'avait obtenues Hertz.

D'un autre côté, l'intensité des effets est plus grande : 1° parce que la capacité plus grande de l'excitateur permet d'y accumuler plus d'électricité avant que l'étincelle n'éclate ; 2° parce que le potentiel réalisé dans le résonateur est notablement plus grand que dans l'excitateur. Voici pourquoi. Le résonateur est placé près de l'excitateur et est formé d'un fil enroulé en hélice. Chacune des spires de cette hélice est le siège d'une force électromotrice induite due au champ produit par l'excitateur, et toutes ces formes électromotrices s'ajoutent. L'appareil est en somme un transformateur dont l'excitateur est le primaire et le résonateur le secondaire. On sait que dans un transformateur, les potentiels du secondaire et du primaire sont entre eux comme les nombres des spires. (Cela serait vrai du moins s'il n'y avait pas de « fuites magnétiques » ; et ici elles sont notables). D'un autre côté, les intensités des courants sont en raison inverse des potentiels ; de sorte que l'on perd en intensité ce que l'on gagne en potentiel. (Il faut bien d'ailleurs qu'il en soit ainsi : sans quoi ce serait le mouvement perpétuel.)

En multipliant les spires du secondaire, c'est-à-dire du résonateur, on a donc augmenté le potentiel de ce résonateur. De ces hauts potentiels et de cette haute fréquence résultent de curieux effets. C'est ainsi qu'on peut allumer une lampe à incandescence unipolaire, c'est-à-dire sans fil de retour. Mais

les effets les plus intéressants sont les effets physiologiques. On a constaté qu'on peut toucher inpunément un fil où circulent ces courants malgré leur potentiel élevé ; mais on préfère généralement les faire agir à distance par induction. On obtient ainsi une excitation générale de l'organisme qui a reçu de nombreuses applications thérapeutiques.

CHAPITRE XII

IMITATION DES PHÉNOMÈNES OPTIQUES

1. **Conditions de l'imitation.** — D'après les idées de Maxwell, la lumière n'est autre chose qu'une perturbation électro-magnétique se propageant à travers l'air, le vide, ou divers milieux transparents. Les radiations électriques émanées d'un excitateur ne diffèrent donc de la lumière que par leur période ; c'est seulement parce que leur longueur d'onde est trop courte qu'elles n'impressionnent pas la rétine.

Nous avons vu en effet que ces perturbations se propagent précisément avec la même vitesse que la lumière. Mais ce n'est pas assez ; il faut montrer qu'elles ont toutes les propriétés de la lumière et qu'on peut reproduire avec elles tous les phénomènes optiques.

La grandeur de la longueur d'onde est cependant un obstacle ; pour se retrouver dans les conditions où l'on observe les phénomènes optiques, il faudrait multiplier toutes les longueurs dans la même proportion, en vertu du principe de similitude.

Si l'on emploie par exemple le grand excitateur de Hertz (longueur d'onde 6 mètres), un miroir pour jouer le même rôle que jouerait un miroir d'un millimètre carré par rapport à la lumière visible, devrait avoir un myriamètre carré.

Avec le petit excitateur de Bose, il faudrait encore un miroir d'un décamètre carré.

Il est clair que cette condition ne sera jamais qu'imparfaitement remplie ; elle le sera d'autant moins mal, cependant, qu'on fera usage d'ondes plus courtes. Avec son petit excitateur, Hertz avait déjà obtenu d'assez bons résultats ; mais, comme on devait s'y attendre, Righi et Bose qui emploient des ondes dix et cent fois plus courtes se sont beaucoup plus approchés de l'imitation parfaite.

Les ondes les plus courtes réalisées par Bose ont, nous l'a-

vons vu, 6 millimètres ; les ondes rouges, les plus longues de celles qui excitent la rétine ont 7/10 millièmes ; elles sont donc 10.000 fois plus courtes ; mais il existe dans le spectre solaire des ondes beaucoup plus longues qui sont sans action sur la rétine et ne se révèlent à nous que par leurs effets calorifiques ; ce sont les ondes *infra-rouges* ; parmi elles nous distinguerons celles que Rubens a récemment isolées sous le nom de *rayons restants* et dont la longueur d'onde est de 20 à 30 microns. Parmi les ondes d'origine optique, ce sont les plus longues, celles qui se rapprochent le plus des ondes électriques ; elles sont encore 200 fois plus courtes.

2. **Interférences**. — Nous avons parlé plus haut, au chapitre IX, des interférences qui se produisent entre les rayons électriques directement émanés de l'excitateur et ceux qui se sont réfléchis sur un miroir métallique. Dans ces expériences, les deux rayons interférents, le rayon direct et le rayon réfléchi, marchent en sens contraire.

On se trouve donc dans des conditions très différentes des appareils optiques destinés à l'étude des interférences, où les deux rayons marchent dans le même sens en se coupant sous un angle très aigu. Plus cet angle est aigu, plus les franges d'interférence sont larges et par conséquent faciles à observer. C'est pour cette raison qu'en optique on ne fait pas ordinairement interférer deux rayons de sens contraire, ce qui donnerait des franges de quelques dix-millièmes de millimètre seulement.

C'est seulement tout récemment que Wiener a réussi à observer des franges optiques obtenues dans ces conditions. Ce sont aussi des franges de cette nature qui se produisent dans la photographie des couleurs de M. Lippmann. On sait que ce savant place la plaque sensible sur une couche de mercure qui joue le rôle de miroir. Le rayon direct interfère avec le rayon réfléchi sur le mercure et qui marche en sens contraire, et il se produit dans la couche sensible une série de franges équidistantes. Ces franges sont tout à fait analogues aux franges électriques étudiées au chapitre IX.

Mais Righi a réalisé une meilleure imitation des expériences habituelles d'interférence. Il fait réfléchir les ondes électriques sur deux miroirs qui font entre eux un petit angle. Si l'on a soin de protéger par un écran métallique le résonateur contre l'action du rayon direct, on peut étudier l'interférence des deux rayons réfléchis. C'est l'expérience des deux miroirs de Fresnel.

On peut aussi placer les deux miroirs dans deux plans parallèles dont la distance n'est pas très grande; on a ainsi une imitation de l'appareil d'interférence dont M. Michelson s'est servi pour la construction optique de centimètres ou de décimètres étalons.

Enfin, au lieu de deux rayons réfléchis sur deux miroirs, on peut faire interférer deux rayons réfractés à travers deux prismes de soufre. C'est l'expérience du biprisme de Fresnel.

3. **Lames minces.** — L'un des plus brillants phénomènes d'interférence de l'optique, est celui des anneaux colorés de Newton; on sait que c'est à lui que les bulles de savon doivent leurs riches couleurs, et qu'il est produit par l'interférence des rayons réfléchis sur les deux surfaces d'une lame mince.

Le phénomène des lames minces peut se reproduire électriquement. Mais tout est relatif; en optique, une lame pour être mince doit avoir une épaisseur qui se compte par millièmes de millimètre; ayant des longueurs d'onde 10 000 ou 500 000 fois plus grandes, Righi employait des lames minces de paraffine de 1 ou 2 centimètres.

4. **Ondes secondaires.** — Un phénomène étudié en détail par M. Righi est celui des ondes secondaires. L'analogie optique en est plus difficile à percevoir et sera discutée au chapitre suivant. Si un résonateur est exposé aux radiations émanées d'un excitateur, il entre en vibration et devient à son tour un centre d'émission. On peut s'en rendre compte en approchant un second résonateur protégé contre les radiations directes par un écran métallique.

Les variations secondaires produites de la sorte par un résonateur, peuvent interférer avec les radiations directes. Les radiations secondaires produites par deux résonateurs peuvent également interférer entre elles.

Enfin, par suite du phénomène de la résonance multiple dont nous avons parlé plus haut en détail, un excitateur peut mettre en vibration deux résonateurs de longueur différente et ces deux résonateurs peuvent agir l'un sur l'autre.

Righi a montré qu'une masse de diélectrique devient, comme un résonateur métallique, un centre d'où émanent des ondes secondaires.

Cela n'a rien d'étonnant. Comment le résonateur répond-il à

l'excitation ? Nous l'avons dit, de la même manière que le tuyau d'orgue (Cf. page 33). Dans ce tuyau, une onde sonore excitée par une cause quelconque se réfléchit aux deux extrémités et subit ainsi une série de réflexions. S'il y a harmonie entre la hauteur du son et la longueur du tuyau, toutes ces ondes ainsi réfléchies produisent des vibrations concordantes qui s'ajoutent, et le son se trouve renforcé.

Dans le résonateur métallique, une perturbation électrique se réfléchit aux deux extrémités du fil, et les ondes ainsi réfléchies peuvent s'ajouter et se renforcer par le même mécanisme.

Si on considère une masse diélectrique, les choses se passeront de même; les perturbations électriques se réfléchiront sur les deux surfaces qui limitent cette masse, comme elles font dans un résonateur, aux deux extrémités du fil métallique.

Une masse diélectrique est donc un véritable résonateur.

Toutes ces ondes secondaires produisent par leurs interférences mutuelles des apparences compliquées que M. Righi a eu beaucoup de mérite à débrouiller.

5. **Diffraction.** — Les phénomènes de diffraction sont d'autant plus sensibles que la longueur d'onde est plus grande. Leur imitation est donc facile avec les ondes électriques. On a reproduit les phénomènes de diffraction dus à une fente, ou au bord d'un écran indéfini.

Mais si, au lieu d'un écran métallique, on fait jouer le rôle du corps opaque à un diélectrique, les phénomènes sont plus compliqués, car il faut tenir compte des ondes secondaires émanées du diélectrique. L'application du principe de Huyghens et de la théorie purement géométrique qui s'en déduit n'est donc pas toujours suffisante. On peut s'en contenter en optique, parce que, par suite de la petitesse de la longueur d'onde, la diffraction ne produit que des déviations extrêmement faibles. Cependant la théorie géométrique se trouve déjà en défaut, pour la lumière visible elle-même, dans les expériences de M. Gouy, sur la diffraction éloignée produite par le tranchant d'un rasoir très affilé.

M. Bose a complété l'imitation des phénomènes de diffraction en construisant de véritables réseaux et en s'en servant pour la mesure des longueurs d'onde de ses vibrations électriques.

6. **Polarisation.** — Les vibrations électriques sont toujours poralisées; car elles sont toujours parallèles à l'axe de l'excita-

teur. Elles sont donc analogues aux vibrations de la lumière polarisée dont la direction est constante et non à celles de la lumière naturelle dont la direction varie à chaque instant en restant toutefois dans un plan perpendiculaire au rayon lumineux.

Cependant on peut imiter l'effet du polariseur qui, quand il est traversé par un rayon déjà polarisé, change l'orientation du plan de polarisation.

Hertz s'est servi pour cela d'un « réseau » formé d'un certain nombre de fils métalliques tendus parallèlement. Nous avons vu qu'un métal arrête les ondulations électriques précisément parce qu'il est conducteur. Un pareil réseau n'est conducteur que dans une direction, celle des fils; il absorbera donc seulement les vibrations parallèles à cette direction et transmettra les vibrations perpendiculaires.

Il importe de ne pas confondre ce réseau polariseur avec le réseau diffracteur dont M. Bose s'est servi et qui se comporte comme ceux de l'optique. Le mode d'action est entièrement différent et cette différence tient à ce fait que dans le réseau polariseur la distance des fils est plus petite et dans le réseau diffracteur plus grande que la longueur d'onde.

Le réseau polariseur n'a pas d'analogue en optique; on pourrait tout au plus le comparer à la tourmaline qui absorbe les vibrations orientées dans une certaine direction.

7. **Polarisation par réflexion**. — Les métaux et les diélectriques réfléchissent les ondes électriques; les effets doivent être les mêmes que ceux de la réflexion métallique et de la réflexion vitreuse sur la lumière polarisée. C'est ce qu'ont vérifié Trouton et Klemencic. M. Righi crut un instant être arrivé à des résultats opposés; mais, quand il eut reconnu l'existence des ondes secondaires et qu'il en eût débrouillé les lois, il confirma au contraire pleinement les conclusions de ses devanciers.

Un point important fut ainsi mis hors de doute : les vibrations électriques sont perpendiculaires au plan de polarisation comme les vibrations lumineuses dans la théorie de Fresnel.

La réflexion sur les métaux produit, comme avec la lumière, une polarisation elliptique ou circulaire.

Les appareils de Righi décèlent très aisément cette polarisation. Donnons au résonateur diverses orientations; si dans une d'elles il y a extinction complète, la polarisation est rectiligne;

si les étincelles ont le même éclat dans tous les azimuts, elle est circulaire. Dans les cas intermédiaires, si l'éclat de l'étincelle passe par un minimum, mais sans s'annuler, elle est elliptique.

8. **Réfraction.** — On a construit de bonne heure avec du soufre ou de la paraffine des prismes et des lentilles qui agissent sur les ondes électriques comme les prismes et lentilles de verre sur la lumière.

La réfraction agit sur le plan de polarisation d'après les mêmes lois qu'en optique. L'action peut être rendue plus sensible par des réflexions multiples, en imitant le phénomène optique des piles de glaces.

Citons une expérience curieuse de M. Bose. On sait que, par suite des réflexions multiples, le verre pilé devient opaque pour la lumière et que la transparence est rétablie si l'on verse du baume de Canada qui a le même indice que le verre. De même, mettons dans une boîte de petits morceaux de résine irréguliers. Les ondes électriques ne peuvent traverser. La transparence est rétablie quand on verse de la kérosène.

Remarquons en passant que certains corps, comme le soufre, sont opaques pour la lumière parce qu'ils sont formés de petits cristaux à la surface desquels il se produit des réflexions. Ils se comportent comme le verre pilé. Ils sont au contraire transparents pour les ondes électriques, parce que ces cristaux étant beaucoup plus petits que la longueur d'onde, vis-à-vis de ces radiations, ils doivent être regardés comme homogènes.

9. **Réflexion totale.** — Les phénomènes de réflexion totale, la polarisation circulaire qui en résulte, s'imitent très aisément ; mais il y a une circonstance curieuse qui me semble bien digne d'attention.

D'après la théorie, quand un rayon lumineux subit la réflexion totale, une partie de l'ébranlement pénètre dans le second milieu, en se comportant suivant des lois toutes particulières. On ne voit rien cependant, parce que cet ébranlement ne pénètre que dans une couche dont l'épaisseur n'est que celle d'une longueur d'onde.

On ne peut, en optique, vérifier directement cette prévision ; on a dû se contenter d'expériences indirectes où intervient un phénomène analogue à celui des anneaux colorés.

Au contraire, avec des ondes très longues, la vérification devient possible. Elle se fait d'une façon satisfaisante, de sorte qu'ici ce sont les ondes électriques qui nous révèlent un des secrets des ondes lumineuses.

10. **Double réfraction.** — Les cristaux sont biréfringents pour les ondes électriques ; mais comme on ne peut employer que des cristaux minces, on a le même phénomène que dans le microscope polarisant où une lame cristalline mince est interposée entre un analyseur et un polariseur.

M. Bose se sert comme analyseur et comme polariseur de réseaux polariseurs de Hertz.

Il faut se garder de confondre deux phénomènes dont les effets dans cet appareil sont analogues, se superposent le plus souvent et ne peuvent être séparés que par une attentive discussion.

Les corps cristallins n'ont pas le même indice de réfraction pour les vibrations de direction différente : c'est la double réfraction proprement dite. D'autre part ils les absorbent inégalement : c'est ce qu'on appelle en optique le dichroïsme.

Les deux phénomènes ont été constatés. Le dichroïsme s'observe surtout avec les corps de structure lamellaire ou fibreuse comme le bois, un livre, une mèche de cheveux. Le mécanisme est comparable à celui du réseau polariseur de Hertz.

M. Bose a montré que le dichroïsme pour les ondes électriques est toujours accompagné d'une inégale conductibilité électrique dans les deux sens.

CHAPITRE XIII

SYNTHÈSE DE LA LUMIÈRE

1. **Synthèse de la lumière.** — Toutes ces expériences mettent en évidence la complète analogie de la lumière et des rayons de force électrique.

Ces rayons, si la période, déjà si petite, était un million de fois plus courte encore, ne différeraient pas des rayons lumineux.

On sait que le soleil nous envoie plusieurs sortes de radiations, les unes lumineuses parce qu'elles agissent sur la rétine, les autres obscures (ultra-violettes ou infra-rouges), qui se manifestent par leurs effets chimiques ou calorifiques. Les premières ne doivent leurs qualités qui nous les font paraître d'une autre nature, qu'à une sorte de hasard physiologique. Pour le physicien, l'infra-rouge ne diffère pas plus du rouge que le rouge du vert ; la longueur d'onde est seulement plus grande ; celle des radiations hertziennes est beaucoup plus grande encore ; mais il n'y a là que des différences de degré, et l'on peut dire, si les idées de Maxwell sont vraies, que l'illustre professeur de Bonn a réalisé une véritable synthèse de la lumière.

La synthèse cependant n'est pas encore parfaite, et d'abord une première difficulté provient de la grandeur même de la longueur d'onde.

On sait que la lumière ne suit pas exactement les lois de l'optique géométrique, et l'écart, qui produit la diffraction, est d'autant plus considérable que la longueur d'onde est plus grande. Avec les grandes longueurs des ondulations hertziennes, ces phénomènes doivent prendre une importance énorme et tout troubler. Sans doute il est heureux, pour le moment du moins, que nos moyens d'observation soient si grossiers ; sans quoi la simplicité qui nous a séduits au premier abord, ferait place à un dédale où nous ne pourrions nous reconnaître. C'est de là probablement

que proviennent diverses anomalies que l'on n'a pu expliquer jusqu'ici.

A ce compte, la petitesse de notre corps et de tous les objets dont nous nous servons serait le seul obstacle à une synthèse parfaite. Pour des géants, qui compteraient habituellement les longueurs par milliers de kilomètres, c'est-à-dire par millions de longueurs d'onde des excitateurs hertziens, qui compteraient les durées par millions de vibrations hertziennes, les rayons hertziens seraient tout à fait ce qu'est pour nous la lumière.

2. **Autres différences.** — Malheureusement il y a encore d'autres différences, et d'abord les oscillations hertziennes s'amortissent très rapidement, tandis que la durée des oscillations lumineuses se compte par trillions de vibrations. C'est ce qui, nous l'avons vu, explique les phénomènes de la résonance multiple qui n'ont pas d'analogues en optique.

Ce n'est pas tout : rappelons-nous ce que c'est que la lumière naturelle : pendant un dixième de seconde (c'est-à-dire pendant la durée de la persistance des impressions rétiniennes), l'orientation de la vibration, son intensité, sa phase, sa période changent des millions de fois : et cependant elles se maintiennent sensiblement constantes pendant des millions de vibrations. Le nombre des vibrations en une seconde se compte en effet par millions de millions.

Il est loin d'en être de même avec les vibrations hertziennes :

1° Elles ne prennent pas toutes les orientations possibles comme celles de la lumière naturelle ; elles conservent une orientation constante comme celles de la lumière polarisée.

2° Leur intensité, loin de se maintenir constante pendant des millions de vibrations, décroît très rapidement de façon à s'annuler après un petit nombre d'oscillations. Quand elles sont éteintes, elles ne recommencent pas immédiatement avec une nouvelle intensité, une phase et une orientation différentes ; mais il se fait un long silence, beaucoup plus long que ne l'a été la période d'activité, et qui n'est rompu que quand fonctionne de nouveau le trembleur de Ruhmkorff.

Nous avons vu, page 65, que l'énergie rayonnée par un excitateur n'est pas la même dans toutes les directions, qu'elle est maxima vers ce que nous avons appelé l'équateur et nulle vers les pôles. Pourquoi ne retrouve-t-on pas les mêmes lois avec la lumière ?

La source lumineuse, à un instant quelconque, n'envoie pas non plus une quantité égale d'énergie dans tous les sens ; il y a aussi un maximum à l'équateur ; seulement, *en un dixième de seconde, l'équateur a si souvent varié, qu'il a pris toutes les orientations possibles,* et il en résulte que notre œil, qui ne perçoit que des moyennes, constate un éclairement uniforme.

Que faudrait-il donc pour avoir une synthèse parfaite de la lumière ? il faudrait concentrer dans un petit espace, un nombre immense d'excitateurs qui seraient orientés dans tous les sens ; il faudrait faire fonctionner ces excitateurs simultanément ou successivement mais sans interruption, de façon que le second entrât en branle avant que les vibrations du premier eussent complètement cessé. Il faudrait enfin, pour constater les effets, un instrument qui enregistrerait les énergies moyennes et qui serait comme une rétine dont les impressions persisteraient pendant des trillions d'oscillations hertziennes.

Ce qu'on obtiendrait ainsi ce serait l'analogue de la lumière blanche, *quand même tous ces excitateurs auraient même période*, à cause de l'amortissement.

Pour avoir quelque chose d'analogue à une lumière sensiblement monochromatique, il faudrait que les excitateurs eussent non seulement à peu près même période, mais encore un amortissement extrêmement faible.

3. **Explication des ondes secondaires**. — J'ai parlé, page 80, des ondes secondaires qu'a découvertes Righi et qui émanent des résonateurs ou des masses diélectriques placés dans le voisinage d'un excitateur. Ces phénomènes ne semblent pas d'abord avoir d'analogie optique.

On ne saurait les comparer à ce qui se passe quand un corps, absorbant la lumière qui le traverse, s'échauffe assez pour devenir lumineux à son tour. Dans ce cas, la transformation ne se fait pas directement, et il faut passer par l'intermédiaire de la chaleur ; de plus, il n'y a aucune relation nécessaire entre la phase des vibrations émises par le corps incandescent et celles des vibrations excitatrices. *Ces vibrations ne pourrraient donc interférer entre elles*.

Il ne faut pas davantage comparer avec les phénomènes de phosphorescence, car les vibrations émises par le corps phosphorescent ne peuvent pas non plus interférer avec les vibrations excitatrices.

La comparaison doit être cherchée ailleurs.

Si les ondes secondaires se forment c'est qu'une partie de la radiation excitatrice a été *diffractée* par le résonateur, ou la masse diélectrique.

Seulement cette « diffraction » diffère beaucoup de celle à laquelle nous sommes accoutumés.

D'abord les déviations sont énormes parce que les dimensions des corps diffracteurs sont comparables aux longueurs d'onde. En second lieu, les phénomènes dépendent de la nature de ces corps, et pas seulement de leur forme comme l'exigerait la théorie géométrique de Fresnel; mais cette théorie n'est qu'une approximation et ne s'applique qu'aux petites déviations comme l'ont montré les expériences de Gouy sur la lumière diffractée par le tranchant d'un rasoir.

Enfin les ondes secondaires produites par les résonateurs ne sont généralement pas de nature identique à celles des ondes incidentes; de même en optique, la nature de la lumière diffractée n'est pas identique à celle de la lumière incidente; c'est ainsi que si la lumière incidente est blanche, la lumière diffractée est généralement colorée.

Seulement, dans les expériences de Hertz et de Righi, cette altération de la lumière par la diffraction nous apparaît sous une forme tout à fait insolite, et nous hésitons à la reconnaître.

L'amortissement de l'excitateur est plus rapide que celui des résonateurs, il arrive que les ondes secondaires qui correspondent à la lumière diffractée, subsistent encore après que les ondes incidentes ont disparu. Cette forme paradoxale de la diffraction paraîtra toute naturelle si l'on y réfléchit un peu.

C'est qu'une vibration amortie, peut, à un certain point de vue, être comparée à une vibration complexe dont les composantes sont dépourvues d'amortissement.

Qu'arrive-t-il au bout d'un certain nombre d'oscillations ? On constate que chacune de ces composantes a conservé son intensité, tandis que la vibration résultante est éteinte. Comment cela se fait-il ? La résultante s'éteint, parce que les composantes se détruisent mutuellement par interférence.

La diffraction analysera cette vibration complexe, comme elle analyse la lumière blanche en séparant les diverses couleurs. Si elle ne laisse subsister qu'une seule des composantes, l'interférence mutuelle des diverses composantes n'en amènera plus la destruction.

La lumière incidente où toutes les composantes se trouvent à la fois, pourra donc être éteinte, tandis que la lumière diffractée, qui n'en contient qu'une seule, brillera encore.

Avec la lumière ordinaire, un pareil phénomène ne se produit jamais; pas plus qu'il ne se produirait avec la lumière hertzienne, si au lieu d'un excitateur unique, nous en avions un très grand nombre se comportant comme je l'expliquais page 87.

Ils entreraient en fonction à des moments quelconques, mais indépendamment l'un de l'autre, et ils seraient assez nombreux pour qu'on n'ait pas à craindre que le concert soit jamais interrompu. On aurait ainsi une synthèse plus parfaite de la lumière, et on voit que dans ce cas les ondes incidentes ne s'éteindraient plus.

Une expérience récente a, d'ailleurs, mieux mis en évidence les analogies optiques des ondes secondaires de Righi.

M. Garbasso recevait les radiations hertziennes sur une sorte d'écran discontinu formé d'un certain nombre de résonateurs identiques. Cet écran réfléchissait des radiations secondaires dont la période et l'amortissement étaient ceux de ces résonateurs.

Ce phénomène, dont l'analogie avec celui des ondes secondaires est évidente, a pu être reproduit en optique. On prenait une lame de verre argentée, on enlevait l'argenture par les traits équidistants et très rapprochés d'une sorte de quadrillage très fin, de sorte que l'argent restant formait un grand nombre de rectangles très petits, assimilables à de véritables résonateurs.

Cet appareil se comportait vis-à-vis de la lumière infra-rouge et en particulier vis-à-vis des *rayons restants* de Rubens, comme le faisait, vis-à-vis des rayons hertziens, celui de M. Garbasso, dont il était la reproduction sous des dimensions très différentes.

4. **Remarques diverses.** — Deux rayons lumineux, qui n'ont pas même origine, ne peuvent interférer, et cela pour la raison suivante. Tout, nous l'avons vu, se passe comme si chacun d'eux était produit par un très grand nombre d'excitateurs, qui se mettraient à vibrer indépendamment l'un de l'autre et à des intervalles irréguliers.

Pendant un dixième de seconde, tous ces excitateurs entrent successivement en fonction, la différence de phase des deux rayons interférents change un très grand nombre de fois; tantôt

ils s'ajoutent, tantôt ils se détruisent ; l'œil, qui ne perçoit qu'une moyenne ne voit donc ni renforcement, ni affaiblissement, il ne voit pas d'interférences. Un seul couple d'excitateurs produirait des franges d'interférence, mais les différents systèmes de franges dus aux différents couples d'excitateurs ne se superposent pas, ils se *brouillent* mutuellement, et on ne voit plus qu'un éclairement uniforme.

Les mêmes raisons ne subsistent pas dans le cas de deux rayons hertziens produits chacun par un excitateur unique, avec une seule interruption du primaire de la bobine. Il n'y a aucune raison pour que les franges d'interférence se brouillent, puisqu'il n'y a plus qu'un système de franges. Les deux rayons quoique d'origine différente, doivent donc pouvoir interférer.

On ne verra pas toujours facilement les interférences, parce que, en général, le second excitateur ne vibrera que trop longtemps après l'extinction du premier ; mais on pourrait y arriver pourtant en alimentant les deux excitateurs avec une même bobine et si l'amortissement n'était pas trop grand. C'est là encore une différence avec l'optique.

On peut se demander aussi qu'elle est l'analogie optique de la propagation le long d'un fil. Le phénomène optique correspondant ne peut pas être mis en évidence, parce que, vu la petitesse de la longueur d'onde, il reste confiné, tant dans l'air que dans le métal, dans une couche d'un ou deux millièmes de millimètre d'épaisseur.

Tout au plus, pourrait-on faire un rapprochement avec le phénomène des fontaines lumineuses où l'énergie lumineuse se propage en suivant une veine liquide ; cette comparaison, moins grossière qu'il ne semble, est cependant bien imparfaite, puisque les fils métalliques sont conducteurs, tandis que la veine liquide se comporte vis-à-vis de la lumière comme un diélectrique transparent.

Néanmoins, on pourrait sans doute reproduire avec les rayons hertziens le phénomène des fontaines lumineuses.

On réaliserait alors une série de modèles avec des diélectriques dont le pouvoir inducteur ε (cf. Chap. x) serait de plus en plus grand, et le cas du fil métallique apparaîtrait à l'extrémité de la série comme cas limite.

CHAPITRE XIV

PRINCIPE DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

1. **Principe de la Télégraphie sans fil.** — On sait depuis Faraday que si un circuit métallique est placé dans le voisinage d'un courant intermittent, alternatif, ou variable, il se produit dans ce circuit des courants secondaires appelés *courants induits*. Cette action se fait sentir à distance, aussi bien à travers un isolant ou à travers l'air qu'à travers un conducteur. Il y a là, théoriquement au moins, un moyen d'envoyer des signaux à distance sans l'intermédiaire d'aucun fil.

Mais cette idée a longtemps paru chimérique. Avec les ressources dont on disposait autrefois, les effets d'induction ne pouvaient être sensibles qu'à de très petites distances, beaucoup trop petites pour qu'on pût songer à en tirer parti.

Ce sont les expériences de Hertz en 1888 qui ont fait entrer la question dans une nouvelle phase.

Nous avons décrit ces expériences dans les chapitres qui précèdent. Suivant les dimensions de l'appareil, la période de ces oscillations varie, comme je l'ai dit, de 2.10^{-8} à 2.10^{-10} secondes.

Les effets d'induction, étant dus aux variations du courant primaire, sont d'autant plus intenses que ces variations sont plus rapides. Il est donc naturel que Hertz, avec de pareilles fréquences, ait pu observer ces effets à plusieurs mètres.

Hertz avait fait une véritable synthèse de la lumière ; ainsi se trouvait confirmée l'idée de Maxwell, d'après laquelle la lumière est due à des phénomènes électriques alternatifs de période très courte.

Les différences apparentes ne sont dues qu'à la durée de la période, ou à ce qu'on appelle la *longueur d'onde*, c'est-à-dire le chemin parcouru par la lumière pendant une période. Si

cette longueur est de quelques dix-millièmes de millimètre, on a les radiations visibles, si elle est de quelques centimètres ou de quelques mètres on a les radiations hertziennes ; de sorte qu'en passant des ondes les plus courtes aux ondes plus longues, on rencontre successivement les rayons chimiques ultra-violets invisibles, les rayons violets, bleus, verts, jaunes, rouges, les rayons calorifiques invisibles et enfin les rayons hertziens, de sorte qu'il n'y a pas d'autre différence entre ceux-ci et la lumière visible qu'entre la lumière verte et la lumière rouge.

Mais alors, si la lumière ordinaire permet d'envoyer au loin des signaux par la télégraphie optique, pourquoi la lumière hertzienne, si je puis m'exprimer ainsi, ne donnerait-elle pas aussi une solution du problème de la télégraphie sans fil ?

2. **Impossibilité de concentrer les radiations.** — La télégraphie optique dispose, il est vrai, d'une ressource qui fait défaut à la télégraphie hertzienne ; elle concentre la lumière par le moyen de lentilles et de miroirs, transforme les rayons divergents, émanés d'une source, en un faisceau de rayons parallèles et les envoie dans une seule direction. Avec des radiations hertziennes, c'est-à-dire avec des ondes de grande longueur, cela n'est plus possible.

On dit communément que la lumière se propage en ligne droite, mais cela n'est qu'à peu près vrai ; sur les bords d'un faisceau lumineux, les rayons s'écartent plus ou moins de leur trajectoire rectiligne et ce phénomène qu'on appelle *diffraction* est d'autant plus accentué que la longueur d'onde est plus grande. Si la lumière visible se propage sensiblement en ligne droite et suit les lois connues de la réflexion et de la réfraction, c'est parce que sa longueur d'onde est plus petite qu'un millième de millimètre, extrêmement petite, par conséquent, par rapport aux dimensions des obstacles qu'elle rencontre, des lentilles qu'elle traverse, des miroirs qui la réfléchissent.

Pour concentrer les ondes hertziennes, il faudrait donc des lentilles énormément plus grandes que la longueur de ces ondes ; sans cela, le phénomène de diffraction deviendra prépondérant et la réfraction ne se fera plus régulièrement. Avec des ondes de quelques mètres, il faudrait donner aux lentilles un diamètre de plusieurs kilomètres ; avec des ondes de quelques centimètres, il faudrait encore de très grandes lentilles.

Il y a d'ailleurs une autre raison qui empêche de songer à employer ces ondes courtes.

Righi a bien pu obtenir des ondes très courtes, mais avec de très petits excitateurs de capacité très petite, où l'on ne peut, par conséquent, accumuler que très peu d'électricité, c'est-à-dire très peu d'énergie. Les effets deviennent alors trop faibles pour pouvoir être utilisés en télégraphie.

3. **Quantité d'énergie transmise**. — Donc, pas de concentration possible. On comprendra combien la difficulté est grande si l'on se rend compte de la faiblesse de l'énergie produite dans un excitateur et c'est ce qu'on pourra faire à l'aide de la comparaison suivante. A chaque décharge, une certaine quantité d'énergie est accumulée dans l'excitateur. C'est elle qui produit les oscillations et ces oscillations se poursuivraient indéfiniment si cette énergie ne se dissipait pas. Mais elle se dissipe de deux manières : d'abord par rayonnement, elle se communique à l'éther ambiant sous forme d'ondes hertziennes ; c'est cette partie de l'énergie qui est utilisable. Ensuite par la résistance des conducteurs, qui agit sur les oscillations électriques comme le frottement agirait sur un pendule, de sorte que, les conducteurs s'échauffant, une partie de l'énergie est transformée en chaleur, et définitivement perdue. C'est le petit espace où l'étincelle éclate qui est de beaucoup le plus résistant, de sorte que presque toute cette énergie perdue est employée à produire la lumière et la chaleur de l'étincelle.

A première vue, et en nous contentant d'une évaluation grossière, nous pouvons admettre que l'énergie ainsi perdue est le dixième de l'énergie totale. Mais toute cette énergie perdue ne se retrouve pas sous forme de lumière visible ; la plus grande partie prend la forme de chaleur obscure. Toutefois, comme la température de l'étincelle est énorme, et par conséquent le rendement lumineux très bon, on peut admettre qu'un dixième de l'énergie de l'étincelle est de la lumière visible. A ce compte, l'énergie de la lumière de l'étincelle serait le centième de celle des ondes hertziennes ; toutes choses égales d'ailleurs, elle devrait donc pénétrer dix fois moins loin. (Je dis dix fois, à cause de la loi du carré des distances.) Si donc la rétine humaine avait la même sensibilité que les appareils qui décèlent les ondes hertziennes à 300 kilomètres, nous devrions voir l'étincelle à 30 kilomètres et cela sans le secours d'aucun

système de concentration. Nous sommes loin de compte, et nous devons conclure que la télégraphie sans fil n'aurait jamais pu fonctionner, si l'on n'avait inventé un appareil beaucoup plus sensible que notre rétine qui, cependant, est déjà un instrument d'une merveilleuse délicatesse.

4. **Description succincte des appareils.** — Cet appareil, d'une exquise sensibilité, sans laquelle la télégraphie sans fil serait toujours restée une chimère, est le *cohéreur*, ou radio-conducteur dont nous avons parlé en détail au chapitre VI. Je n'ai donc pas à y revenir.

Un autre organe essentiel de la Télégraphie sans fil est *l'an-*

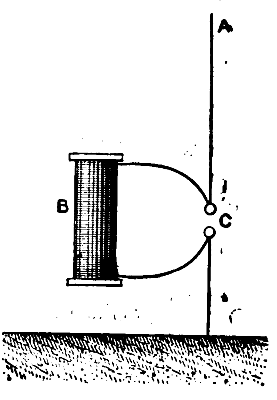


Fig. 6.

Cette figure représente l'appareil transmetteur, elle est schématique elle n'est pas à l'échelle, pas même grossièrement ; il est clair en effet, que, l'antenne ayant 50^m, les autres parties de l'appareil n'auraient pu être représentées si les proportions avaient été conservées. Cette observation s'applique à toutes les figures suivantes.

A, antenne. — C. intervalle où éclate l'étincelle. — B. bobine de Ruhmkorff.

tenne dont l'invention est due à Popoff. C'est une longue tige métallique verticale de 10^m à 50^m, soutenue par un mât. Elle est mise en communication avec une des deux moitiés de l'excitateur (qui se compose, je le rappelle, de deux conducteurs entre lesquels éclate une étincelle) ; l'autre moitié communique avec le sol.

Je discuterai plus loin le rôle de l'antenne.

L'appareil transmetteur se composera donc d'un excitateur dont une moitié communique avec l'antenne et l'autre avec le sol (fig. 6).

L'appareil récepteur se composera d'une antenne et d'un cohéreur dont une des électrodes communique d'une part avec l'antenne réceptrice (fig. 7) et d'autre part avec un des pôles d'une pile, tandis que l'autre électrode communique d'une part avec le sol, et d'autre part avec l'autre pôle de la pile.

Quand, à la station de transmission, on fera fonctionner la bobine de Ruhmkorff, des oscillations électriques se produiront dans le système formé par l'excitateur et l'antenne, l'énergie de ces oscillations rayonnera au dehors sous forme d'on-

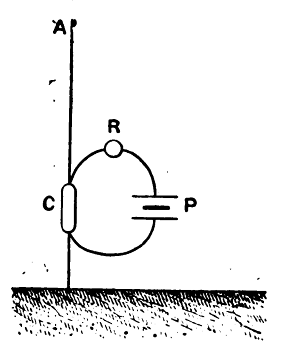


Fig. 7. — Appareil récepteur..

A. antenne. — R, relais faisant fonctionner le Morse. — P, pile locale. — C, cohéreur.

dulations hertziennes ; elle atteindra l'antenne réceptrice ; des courants induits oscillatoires se produiront alors de l'antenne au sol à travers le cohéreur ; ces courants seront excessivement faibles, mais ils suffiront pour impressionner le cohéreur qui deviendra conducteur. Le courant de la pile passera alors et actionnera un appareil Morse. Un petit marteau trembleur, en frappant périodiquement le cohéreur, lui fera perdre sa conductibilité et le rendra ainsi capable de recevoir un nouveau signal.

5. **Explications théoriques.** — Certains savants répugnent à admettre l'explication classique de la Télégraphie sans fil, ils invoquent divers arguments que nous allons examiner :

1° Ils s'étonnent que l'effet puisse être sensible à des centaines de kilomètres, s'il diminue, avec la distance, suivant la même loi que la lumière ; et ils en concluent que la propagation s'effectue par quelque processus différent, tel que la décroissance avec la distance soit moins rapide. Mais ils n'ont jusqu'ici rien pu trouver qui paraisse d'accord avec ce que nous savons de l'électricité.

2° Ils remarquent que les ondes hertziennes contournent les obstacles et ne se propagent pas en ligne droite comme la lumière. Ils oublient que la lumière non plus ne marche qu'à peu près en ligne droite ; que, par suite de la diffraction, un peu de lumière pénètre dans l'ombre géométrique. Or, la diffraction est d'autant plus marquée que la longueur d'onde est plus grande ; donc, les ondes hertziennes, qui sont 1 million de fois plus longues que les ondes lumineuses, pénétreront beaucoup plus facilement dans l'ombre géométrique et contournent ainsi des obstacles qui nous paraissent énormes, tels que de petites collines, ou la convexité du globe terrestre qui, pour des distances de plusieurs centaines de kilomètres, représente un obstacle de plusieurs centaines de mètres de hauteur.

3° Ils font observer que la propagation est beaucoup plus facile sur mer que sur terre ; c'est en effet ce que toutes les expériences confirment ; ils en concluent que la conductibilité du sol joue un rôle prépondérant. Mais le fait tient-il à la conductibilité de l'eau de mer, qui est d'ailleurs très faible pour des courants de haute fréquence, ou s'explique-t-il par l'absence d'obstacles géométriques ? C'est ce qu'il est encore difficile de dire.

D'ailleurs une expérience directe a montré qu'un cohéreur fonctionnait s'il était placé au fond d'un trou creusé dans la terre, *sans être recouvert*, mais qu'il restait inactif s'il était enterré : ce qui prouve bien que les ondes ne passent pas à travers la terre par conduction, que par conséquent elles ne traversent pas les obstacles, mais qu'elles les contournent par diffraction.

Il est vrai, d'autre part, que la portée est sensiblement doublée quand l'excitateur communique avec le sol ; nous verrons tout à l'heure pourquoi ; mais quand on supprime cette communication la portée en est seulement amoindrie, tandis que la transmission devrait cesser complètement si elle se faisait par la terre. Les expériences de M. le capitaine Ferrié ont mis le fait hors de doute.

6. **Mesure de la longueur d'onde.** — En résumé, aucun de ces arguments n'a paru convaincant à la majorité des physiciens. Mais une autre question se pose : l'excitateur se compose de deux petites boules entre lesquelles éclate l'étincelle ; les ondes ont-elles même période que si ces deux boules étaient isolées ; ou bien le système de l'antenne, des deux boules et du sol fonctionne-t-il comme un grand excitateur, qui émettrait alors des ondes bien plus longues ? Dans la première hypothèse, à laquelle on a cru longtemps, l'antenne ne jouerait que le rôle d'un fil conducteur, qui amènerait les ondes émises par les deux petites boules jusqu'à son extrémité supérieure et les transmettrait ensuite à l'éther ambiant.

Aucune de ces deux hypothèses n'est absurde ; l'appareil pourrait émettre soit des ondes longues, soit des ondes courtes, de même qu'une corde vibrante peut donner plusieurs sons harmoniques. Mais l'expérience a décidé en faveur de la seconde. M. le lieutenant de vaisseau Tissot a mesuré directement la période par le moyen d'un miroir tournant ; il a trouvé 0,06 à $1,8.10^{-6}$ seconde. Les ondes sont donc cent à mille fois plus longues que celles obtenues par Hertz, dix à cent mille fois plus longues que celles de Righi, un milliard de fois plus longues que les ondes lumineuses.

C'est même grâce à cette circonstance que la mesure a été possible : les vibrations réalisées par Hertz auraient été trop rapides et le miroir tournant n'aurait pas pu décomposer l'étincelle. C'est là en même temps une vérification du caractère périodique du phénomène.

Il resterait, pour achever de contrôler la théorie, à mesurer la vitesse de propagation. Le problème ne paraît pas inabordable ; il semble qu'un même ébranlement parti de l'excitateur pourrait être transmis à une même station par deux chemins : par un fil, et à travers l'air. Deux étincelles éclateraient à la station d'arrivée et un miroir tournant permettrait d'apprécier l'intervalle de temps qui les sépare. On pourrait donc comparer la vitesse des ondes hertziennes à travers l'air et dans un fil ; quant à cette dernière elle a été déterminée par l'expérience de Blondlot.

Il serait aussi intéressant de savoir quelle est la quantité d'énergie rayonnée dans les directions obliques ; mais cela ne pourrait se faire que par des expériences en ballon.

M. Ferrié a fait avec des ballons captifs des expériences qui ne

sont pas très favorables à la théorie ; il serait désirable que l'on multipliât les expériences de ce genre.

7. **Rôle de l'antenne.** — Je terminerai ces considérations théoriques en parlant du rôle de l'antenne. L'expérience a montré que la longueur des antennes doit être proportionnelle à la racine carrée de la distance à franchir. Pourquoi ? Est-ce pour que la droite qui joint les extrémités des deux antennes ne rencontre pas la terre ? Non, il faudrait pour cela des antennes beaucoup plus grandes. C'est plutôt parce qu'en augmentant leurs dimensions, on augmente la longueur d'onde et par conséquent le phénomène de diffraction par lequel peut être contourné l'obstacle dû à la rotondité du globe.

D'ailleurs plus l'antenne réceptrice est longue, plus est grande la surface par laquelle les radiations sont captées ; tout se passe comme si on regardait une lumière lointaine avec une lunette dont l'objectif aurait une très grande ouverture.

Si l'on a avantage à relier l'excitateur au sol, c'est parce que la capacité de la seconde partie de l'excitateur devient ainsi pratiquement infinie. La longueur d'onde est alors doublée.

Pourquoi maintenant l'antenne doit-elle être verticale ? Les sources de lumière naturelle donnent des vibrations dont la direction change constamment ; par conséquent, l'énergie est rayonnée également dans tous les sens. Avec une antenne verticale, au contraire, la vibration est rectiligne et toujours verticale ; elle est *naturellement polarisée*. Il en résulte qu'il y a plus d'énergie rayonnée dans le plan horizontal, c'est-à-dire dans les directions utiles, que dans les directions verticale ou oblique. On peut calculer qu'il y a une fois et demie plus d'énergie rayonnée dans le plan horizontal que si l'émission se faisait comme celle de la lumière naturelle et trois fois plus d'énergie utilisable, parce que l'antenne réceptrice utilise toute la vibration qu'elle reçoit et qui est verticale comme elle. Au contraire, dans le cas d'une radiation comparable à la lumière naturelle, un appareil récepteur quelconque ne pourrait utiliser que la moitié de l'énergie qu'elle recevrait, à savoir celle des vibrations qui auraient même direction que lui.

Mais on ne se ferait ainsi qu'une idée insuffisante de la supériorité des excitateurs rectilignes. Un excitateur courbé, formé par exemple d'un fil presque fermé réunissant les deux armatures d'un condensateur, ne serait nullement comparable à une

source de lumière naturelle. Nous aurions une sorte de circuit fermé, et par conséquent un fil d'aller et un fil de retour dont les actions de sens contraire se feraient sentir à peu près simultanément, surtout si les dimensions de l'appareil étaient petites par rapport à la longueur d'onde. *Ces actions se compenseraient alors presque complètement.* Au contraire, avec un excitateur rectiligne, toutes les actions s'ajoutent [1]; avec une source de lumière naturelle, les vibrations de sens opposé ne sont pas simultanées, mais elles se succèdent et, comme cette succession est irrégulière, il n'y a pas de raison pour que la compensation se fasse.

Les lois du rayonnement émané d'un excitateur rectiligne sont donc les mêmes que celles des radiations lumineuses ; l'amplitude des vibrations varie en raison inverse du carré des distances. Au contraire, dans le cas d'une compensation complète, l'amplitude varierait en raison inverse du carré de la distance, et l'énergie en raison inverse de la quatrième puissance. Avec un excitateur presque fermé, la compensation serait presque complète et l'on se rapprocherait de cette dernière loi.

J'ai dit que c'est pour augmenter la longueur d'onde qu'on augmente la hauteur des antennes. Mais il ne faudrait pas croire qu'on obtiendrait les mêmes résultats en augmentant la longueur d'onde par d'autres moyens, c'est-à-dire en augmentant d'une manière quelconque la capacité [2] ou la self-induction, la longueur d'onde étant, comme on sait, à un facteur constant près, moyenne proportionnelle entre ces deux quantités. D'après ce qui précède, la forme de l'excitateur est au contraire très importante, et nous venons de voir que l'excitateur ne saurait s'éloigner beaucoup de la forme rectiligne sans devenir incapable de rayonner.

[1] Cependant la transmission ne se ferait pas si les deux antennes étaient rectilignes, horizontales toutes deux et parallèles ; parce que, dans ces conditions, la vibration directe interférerait avec la vibration réfléchie sur le sol ou sur la mer.

[2] Remarquons que la « capacité dynamique » qui intervient dans le calcul de la longueur d'onde n'est pas égale à la capacité mesurée par des procédés statiques, attendu que la distribution électrique pendant les oscillations diffère beaucoup de celle qui correspondrait à l'équilibre électrostatique. J'insiste sur ce point, parce qu'avec certaines antennes la capacité dynamique peut être dix ou quinze fois plus grande que la capacité statique.

Cependant, M. Marconi semble avoir entrepris des expériences pour remplacer l'antenne par un cylindre large et court, mais les résultats en sont encore tenus secrets.

8. **Importance de l'amortissement.** — L'énergie accumulée dans l'excitateur se dissipe par le rayonnement; l'amplitude des oscillations décroît donc rapidement : c'est ce qu'on appelle l'*amortissement*. Il est clair que, plus cet amortissement sera grand, plus courte sera la durée totale de l'ébranlement; plus par conséquent l'ébranlement maximum sera grand pour une même quantité d'énergie accumulée. Or comme nous l'avons vu le cohéreur a d'autant plus de chance d'être impressionné que l'ébranlement *maximum* est plus fort; l'ébranlement *moyen* n'importe pas.

D'après ce que nous venons de dire, nous devons donc nous attendre à ce qu'un fort amortissement soit favorable aux transmissions lointaines. C'est en effet ce qu'ont démontré les expériences de M. Tissot. Et même quelques-unes de ces expériences semblent prouver que si la mise au sol de l'excitateur favorise la transmission, ce n'est pas seulement parce qu'elle augmente la longueur d'onde et par là la diffraction, ni parce qu'elle augmente la capacité et par là l'énergie totale accumulée, mais surtout parce qu'elle augmente l'amortissement.

CHAPITRE XV

APPLICATIONS DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

1. **Avantages et inconvénients de la Télégraphie sans fil.** — La télégraphie hertzienne est comparable, comme nous l'avons dit, à la télégraphie optique. Il y a cependant d'assez grandes dissemblances provenant toutes de la différence des longueurs d'onde. La longueur d'onde étant plus grande, la diffraction devient notable ; d'où la possibilité de contourner les obstacles. L'obstacle le plus important est celui qui est dû à la rotondité même du globe; la lumière ordinaire ne peut ni la traverser, ni la tourner; en télégraphie optique on ne pourra donc communiquer à de grandes distances qu'à la condition d'avoir des postes très élevés. Avec des ondes longues, la diffraction est assez grande pour qu'il soit possible de contourner la convexité terrestre : on peut donc communiquer entre des points qui ne se voient pas. Ainsi a disparu la principale difficulté qui limitait la distance franchissable. Ainsi, avec la télégraphie optique on allait à 40^{km} ou 50^{km} en choisissant des postes favorables; avec la télégraphie sans fil on ira à 300^{km}.

D'autre part, la lumière visible est arrêtée par le brouillard, il n'en est pas de même de la lumière hertzienne? Pourquoi? Si la lumière est arrêtée, ce n'est pas précisément qu'elle soit absorbée, car elle traverserait sans peine la même quantité d'eau à l'état de liquide homogène; elle est dissipée par les réflexions multiples qu'elle subit à la surface des innombrables vésicules du brouillard. C'est pour la même raison que le verre compact est transparent, tandis que le verre pilé est opaque. Mais pour que ces réflexions se produisent, il faut que les dimensions de ces vésicules soient grandes par rapport à une longueur d'onde. Une observation vulgaire le fera

comprendre. On voit souvent sur les bulles de savon, au milieu des plages colorées, des taches entièrement noires ; ce sont les places où l'épaisseur de la bulle est non pas nulle (elle ne l'est nulle part, puisque la bulle n'est pas crevée), mais notablement plus petite qu'une longueur d'onde. Dans ces conditions, la surface de la bulle ne réfléchit plus de lumière et c'est pour cela qu'elle paraît noire.

Or, les dimensions des vésicules sont très grandes par rapport aux longueurs d'ondes lumineuses, très petites au contraire par rapport aux longueurs d'ondes hertziennes. C'est ce qui explique pourquoi elles se comportent si différemment dans les deux cas.

Cette transmission facile de la lumière hertzienne à travers le brouillard est une propriété précieuse, et l'on a proposé de s'en servir pour éviter les collisions en mer.

Nous avons vu que l'on doit renoncer à concentrer les ondes hertziennes dans une seule direction comme on le fait en télégraphie optique. Mais cet inconvénient emporte avec lui un avantage. Si les radiations sont concentrées dans une seule direction, il faut régler cette direction ; ce réglage est long et délicat, de sorte qu'on ne peut guère communiquer qu'entre des postes fixes. Au contraire, les ondes hertziennes étant envoyées indifféremment dans toutes les directions, permettront de communiquer avec un poste mobile quand même la position s'en serait pas connue. D'où l'importance du nouveau système pour la marine.

Voici maintenant les inconvénients. La télégraphie optique et la télégraphie hertzienne ont sur la télégraphie ordinaire un avantage commun : c'est qu'en temps de guerre l'ennemi ne peut pas interrompre les communications en coupant les fils. Mais avec la télégraphie optique, le secret est assuré à moins que l'ennemi ne puisse se placer sur la trajectoire du mince filet lumineux envoyé d'une station à l'autre, et qui passe le plus souvent à une grande hauteur. Les ondes hertziennes sont, au contraire, envoyées dans toutes les directions ; elles peuvent donc impressionner les cohéreurs ennemis aussi bien que les cohéreurs amis et, pour le secret, on ne peut plus se fier qu'à son chiffre. De plus, l'ennemi peut troubler les communications en envoyant des signaux incohérents qui viendront se confondre avec les signaux émis par la station amie. Même en temps de paix, il importerait d'assurer le secret des correspondances et,

d'autre part, on peut prévoir un moment où les appareils se multipliant, les signaux émis par plusieurs stations voisines se superposeront de façon à engendrer une confusion inextricable. On se souvient qu'Edison avait menacé ses concurrents européens, s'ils voulaient expérimenter en Amérique, de troubler leurs expériences de cette manière.

2. **Principe de la Télégraphie syntonique**. — Tels sont les inconvénients que les inventeurs ont cherché à atténuer. Bien des procédés ont été proposés, mais je ne parlerai que de ceux que l'on a commencé à soumettre à des essais pratiques et qui sont tous fondés sur le principe de « syntonisation », c'est-à-dire qui cherchent tous à imiter le phénomène acoustique de la résonance. On sait qu'un corps sonore, placé dans le voisinage d'un autre corps vibrant, entrera lui-même en vibration, mais que ces vibrations, très fortes si les sons propres des deux corps sont à l'unisson, seront presque insensibles pour peu que l'on s'écarte de cet unisson.

Si l'on pouvait obtenir les mêmes résultats avec des vibrations électriques, le problème serait résolu. Ces signaux de période différente pourraient se superposer sans dommage, chaque récepteur démêlerait celui pour lequel il serait accordé. D'ailleurs nous n'aurions plus à craindre que l'ennemi intercepte nos télégrammes, puisqu'il ne sait pas quelle est la période de notre excitateur.

Malheureusement il y a de grandes difficultés. Sans doute un récepteur vibre mieux s'il est à l'unisson de l'excitateur; mais si l'on s'écarte de cet unisson, l'amplitude des vibrations, au lieu de devenir presque brusquement insensible, comme en acoustique, décroît avec une certaine lenteur. Il y a donc résonance, mais résonance imparfaite.

Et encore, cette résonance, nous la connaissons par les anciennes expériences de Hertz qui n'employait pas le cohéreur. Nous l'ignorerions peut-être encore si l'on s'était toujours servi du tube à limaille. Le cohéreur en effet, à cause de sa sensibilité même, ne saurait distinguer ces différences. Il est impressionné par des excitations très faibles et comme ce n'est qu'un appareil de déclenchement, il ne répond pas mieux aux excitations fortes qu'aux excitations faibles, pourvu que celles-ci dépassent la limite de sa sensibilité. C'est pourquoi la période peut varier de 1 à 20, comme pour deux sons dis-

tants de cinq octaves, sans qu'on constate de différence appréciable dans la qualité de la réception.

Pourquoi cette différence entre la résonance acoustique et la résonance électrique? C'est parce que les oscillations, nous l'avons vu, *s'amortissent* très rapidement; il en résulte que les vibrations électriques sont plutôt comparables à un bruit qu'à un son musical pur.

3. **Transmetteur de Marconi.** — De nombreuses tentatives ont été faites pour triompher de ces difficultés. Autant qu'on

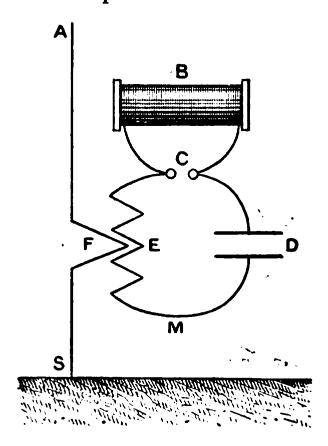


Fig. 8. — Transmetteur Marconi.

B, bobine de Ruhmkorff. — CDME, excitateur primaire. — C, intervalle où éclate l'étincelle. — D, bouteilles de Leyde. — AFS, secondaire. — A, antenne. — F, enroulement secondaire du transformateur. — S, sol. Les bouteilles de Leyde D et le transformateur EF sont représentés schématiquement suivant l'usage des électriciens.

peut en juger (car les inventeurs ont naturellement cherché à conserver leur secret), tous les appareils se ressemblent dans leurs traits essentiels. Après avoir signalé en passant l'idée ingénieuse de M. Slaby qui place le cohéreur, non dans le voisinage d'un nœud où l'amplitude des variations est minimum, mais au contraire dans le voisinage d'un ventre, je crois qu'il suffira de décrire succinctement l'un de ces appareils, en choisissant celui sur lequel nous avons le plus de détails. Je m'étendrai donc seulement sur les procédés qui ont servi à M. Marconi

pour communiquer de Wimereux à Douvres par-dessus le Pas-de-Calais, et d'Antibes en Corse par-dessus la Méditerranée.

Le nouveau transmetteur Marconi (fig. 8) se compose d'un excitateur primaire et d'un appareil secondaire. L'excitateur primaire est formé de treize bouteilles de Leyde, associées en quantité, dont les armatures sont réunies par un fil; ce fil est interrompu sur quelques millimètres et c'est dans cette interruption que jaillit l'étincelle. Les armatures sont d'autre part en connexion avec les deux pôles de la bobine de Ruhmkorff. La bobine charge les bouteilles, comme nous l'avons expliqué, et, quand l'étincelle éclate, les bouteilles se déchargent en oscillant. *On remarquera que cet excitateur n'est pas rectiligne, mais presque fermé sur lui-même.*

Le secondaire est formé par l'antenne directement reliée au sol. Il n'y a donc plus connexion directe entre l'antenne et l'excitateur : et l'ébranlement ne se transmet à l'antenne que par induction ; voici comment. On sait ce que c'est qu'un transformateur : c'est une bobine sur laquelle s'enroulent deux fils ; quand on produit un courant variable dans l'un des fils il naît un courant induit dans l'autre fil. C'est un appareil analogue qui transmet ici l'ébranlement ; autour d'un cadre de bois plongé dans l'huile s'enroulent, d'une part, quelques spires du fil primaire de l'excitateur et, d'autre part, une spire du fil secondaire qui relie l'antenne au sol.

On peut prévoir que ce dispositif réduira l'amortissement, de sorte que l'oscillation électrique se rapprochera un peu du son musical pur. J'ai dit plus haut qu'un excitateur presque fermé rayonne très mal ; c'est justement pour cela qu'il conserve son énergie et qu'il s'amortit lentement. Il la conserverait bien plus longtemps encore si, par le transformateur, il n'en transmettait une partie au secondaire et à l'antenne. Celle-ci rayonne rapidement ce qu'elle a reçu, et cependant l'amplitude de ses vibrations se maintient quelque temps, parce qu'à mesure qu'elle perd de l'énergie par rayonnement, elle en reçoit du transformateur jusqu'à ce que la provision accumulée dans le primaire soit épuisée.

Ainsi l'amortissement doit être plus faible qu'avec les appareils ordinaires ; et il serait plus faible encore si l'antenne rayonnante n'était pas reliée au secondaire. C'est ce que confirment les expériences de M. Tissot. Ce savant officier, observant avec un miroir tournant l'étincelle de l'appareil ordinaire,

obtenait au plus trois images de cette étincelle : ce qui veut dire qu'au bout de trois vibrations les oscillations étaient devenues insensibles ; avec un dispositif analogue à celui de Marconi, il en obtenait dix ; il en avait bien davantage quand l'antenne n'était pas reliée au secondaire.

J'ai dit qu'un fort amortissement était favorable aux transmissions lointaines. Ici l'amortissement est diminué sans que la portée soit amoindrie ; car l'énergie totale accumulée est plus grande à cause de la grande capacité des bouteilles de Leyde. On peut calculer la provision d'énergie accumulée d'après cette capacité et la différence de potentiel mesurée par la longueur de l'étincelle ; d'autre part la durée de la perturbation est, d'après l'expérience que je viens de citer, de dix oscillations ou de $\frac{1}{100\,000}$ de seconde ; c'est pendant cette durée que cette provision doit être dépensée ; on trouve ainsi que, pendant ce temps très court, la puissance moyenne sera d'une trentaine de chevaux-vapeur ; on voit que l'*ébranlement maximum* peut rester considérable. De plus, si l'on obtenait réellement la résonance, cet ébranlement maximum se trouverait multiplié *pour les récepteurs à l'unisson*, parce que les effets des vibrations successives seraient concordants et s'ajouteraient les uns aux autres. Comme résultat final, la portée serait augmentée pour les recepteurs à l'unisson et diminuée pour les autres.

4. **Récepteur Marcon .** — Dans le récepteur, comme dans le transmetteur, l'antenne est directement reliée au sol (fig. 9). L'ébranlement reçu par cette antenne est transmis par induction au circuit du cohéreur, par le moyen d'un transformateur particulier appelé *jigger*. Ce transformateur diffère beaucoup de celui du transmetteur ; il ne s'agit plus en effet de faire passer l'énergie du primaire (qui est ici l'antenne) au secondaire (qui est ici le circuit du cohéreur), *peu à peu* afin d'obtenir un faible amortissement, mais au contraire *très rapidement* pour que l'ébranlement maximum reçu par le cohéreur soit aussi grand que possible.

Le secondaire du jigger se compose de deux bobines distinctes qui sont reliées : 1° aux deux armatures d'un condensateur ; 2° aux deux électrodes du cohéreur ; 3° aux deux pôles d'une pile locale par des fils traversant des bobines de self-induction. Le circuit parcouru par les courants oscillants com-

prend le condensateur, les bobines du jigger et le cohéreur ; cet ensemble est donc analogue à un excitateur presque fermé. Le circuit parcouru par le courant de la pile locale comprend la pile, les bobines de self-induction, les bobines du jigger et le cohéreur. Le courant continu de la pile ne peut emprunter le premier circuit puisqu'il ne peut passer à travers le conden-

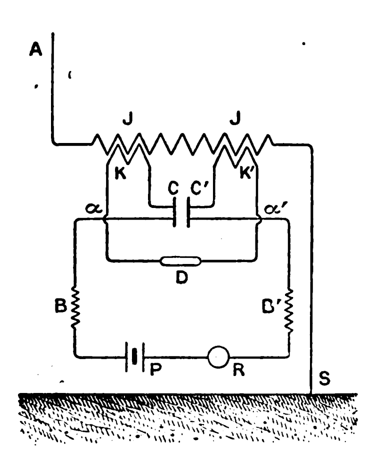


Fig. 9. — Récepteur Marconi.

AJS, primaire. — A, antenne. — J, enroulement primaire du jigger. — S, sol. — CKDK'C', circuit où se produisent les oscillations secondaires. — CC', armatures du condensateur. — KK', bobines secondaires du jigger. — D, cohéreur. — PRB'C'KCBP, circuit de la pile locale. — P, pile locale. — R, relais actionnant le Morse. — BB', bobines de self-induction.

Sur la figure, les deux circuits se croisent en α et en α', mais les fils passent l'un au-dessus de l'autre sans être en connexion.

sateur ; il ne passera donc que quand le cohéreur sera rendu conducteur par les oscillations hertziennes.

D'un autre côté les bobines de self-induction n'opposent, comme on sait, aucune résistance aux courants continus, tandis qu'elles arrêtent les courants alternatifs rapides ; de même qu'une forte masse, à cause de son inertie, pourra prendre une grande vitesse uniforme sous l'influence d'une force constante, mais ne prendra pas facilement un mouvement alternatif. Elles ne gêneront donc pas le courant de la pile, tandis qu'elles

arrêteront les oscillations hertziennes et les empêcheront d'aller se perdre dans le circuit de la pile locale.

Il paraît qu'avec ces dispositifs on peut, par un réglage convenable, obtenir une sorte de résonance. Est-ce parce que l'amortissement est plus faible ? C'est possible, mais nous n'en savons pas assez pour que nous puissions l'affirmer.

Mais il ne faut pas se faire d'illusions sur la perfection de cette résonnance. Un même récepteur sera indifféremment impressionné par des ondes de longueur assez différente ; telle une oreille qui distinguerait l'octave, mais ne pourrait discerner les intervalles plus petits.

Le secret des correspondances n'est donc pas assuré ; supposons que la transmision doive se faire à 50^{km}, les récepteurs placés à cette distance ne fonctionneront que s'ils sont *à peu près* à l'unisson du transmetteur ; mais dans un rayon de 5^{km}, par exemple, tous les cohéreurs, accordés ou non, seront également impressionnés. Et même à grande distance, il ne faudra pas de longs tâtonnements pour obtenir un unisson suffisant.

En revanche les nouveaux procédés suffiront peut-être pour éviter la confusion des signaux émanés d'un certain nombre d'antennes voisines.

Signalons en passant que dans ces derniers temps M. Tissot a pu transmettre des signaux de télégraphie sans fil, *sans employer de cohéreur* mais en se servant du *bolomètre* décrit plus haut page 35. Cet appareil, étant sensible à l'ébranlement moyen, et non pas à l'ébranlement maximum comme le cohéreur, permet d'obtenir une résonnance beaucoup plus parfaite.

5. **Télégraphie sans fil transatlantique.** — Il y a quelque temps, M. Marconi annonça qu'il avait pu communiquer depuis la pointe de Cornouailles en Angleterre jusqu'à Terre-Neuve. Bien que le résultat obtenu entre la Corse et la Côte d'Azur eut déjà préparé les esprits, la nouvelle ne fut pas accueillie sans scepticisme. Bientôt on apprit que la même station de Poldhu, en Cornouailles, avait communiqué avec un navire italien, le Carlo-Alberto, dans la rade de Spezzia. La distance était à peu près trois fois moindre, mais la difficulté était presque la même, car la communication par mer est toujours plus facile que par terre, et dans ce cas on avait à franchir l'obstacle opposé par le massif central de la France.

Cette fois le doute était plus difficile ; car les témoins n'étaient plus uniquement des lanceurs d'affaires, et il aurait fallu s'assurer la complicité des officiers du navire de guerre italien. D'ailleurs des postes intermédiaires avaient reçu en route la dépêche qui ne leur était pas destinée, ce qui prouvait à la fois que cette dépêche n'était pas une simple mystification et que les dispositifs de syntonie les plus perfectionnés ne suffisent pas pour assurer le secret des correspondances. En même temps, ces postes intermédiaires indiscrets nous révélaient un détail que les comptes rendus officiels avaient oublié de mentionner, c'est qu'il fallut répéter le télégramme pendant cinquante-cinq heures de suite, et que ce n'est qu'au bout de ce temps que le poste destinataire reçut le signal. Plus récemment, on a recommencé à communiquer entre Poldhu et la côte du Canada.

La difficulté est double ; d'abord l'énergie transmise variait en sens inverse du carré des distances, même s'il n'y avait pas d'obstacle. Ensuite l'obstacle opposé par la rotondité de la terre augmente avec la distance, de sorte que la proportion d'énergie diffractée sera d'autant plus faible que la distance sera plus grande. Néanmoins il semble que cette double difficulté a été vaincue ; est-ce simplement grâce à l'énorme puissance des appareils, à l'emploi des grandes longueurs d'onde, à la sensibilité du cohéreur ; il n'est pas impossible de l'admettre, si l'on se rappelle ce que nous avons dit plus haut page 41 ; ou bien la théorie est-elle en défaut et devient-elle insuffisante pour rendre compte des faits ; ou bien enfin la lumière hertzienne, va-t-elle se réfléchir sur les couches supérieures de l'atmosphère, qui seraient assez raréfiées pour être conductrices, comme je l'explique page 42 ?

Comment ces résultats ont-ils été obtenus ? il semble que ce soit surtout en accroissant énormément la puissance et toutes les dimensions.

1° Le cohéreur ordinaire a été remplacé par le détecteur magnétique dont j'ai dit un mot page 43.

2° L'antenne unique est remplacée par un faisceau divergent de 400 câbles d'une centaine de mètres de longueur. Ces câbles sont tendus obliquement, de telle sorte que l'extrémité supérieure est à 70 mètres au-dessus du sol.

3° L'appareil producteur se compose d'un alternateur de 2000 volts et de 50 kilowatts ; le courant est envoyé dans le

primaire d'un transformateur ; l'alternateur joue le rôle de la pile génératrice des appareils ordinaires et le primaire du transformateur joue le rôle du primaire de la bobine de Ruhmkorff. Le secondaire de ce transformateur qui porte la tension à 2000 volts et qui joue le rôle du secondaire de la bobine est relié à un excitateur primaire analogue à l'excitateur CDME de la figure 8.

Mais cet excitateur n'agit pas directement par induction sur le circuit de l'antenne, comme dans le transmetteur représenté sur la figure. Il agit sur un second excitateur qui à son tour agit sur le circuit de l'antenne.

La tension étant de 20 000 volts et la capacité des condensateurs de 1 microfarad ; si cette provision d'énergie correspondante est dépensée en $\frac{1}{100\,000}$ de seconde, cela correspond à une puissance de 40 000 kilowatts ou près de 50 000 chevaux ; elle est donc près de 2000 fois plus forte que dans les expériences Corse-Antibes ; on s'explique ainsi qu'elle permette d'atteindre une portée vingt fois plus rapide.

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

SCIENTIA

Exposé et Développement des questions scientifiques à l'ordre du jour

RECUEIL PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION DE

MM. APPELL, D'ARSONVAL, HALLER, LIPPMANN, MOISSAN, POINCARÉ, POTIER, Membres de l'Institut,

Pour la Partie Physico-Mathématique

ET DE

MM. D'ARSONVAL, FOUQUÉ, GAUDRY, GUIGNARD, MAREY, Membres de l'Institut: HENNEGUY, Professeur au Collège de France,

Pour la Partie Biologique

Chaque fascicule comprend de 80 à 100 pages in-8° écu, avec cartonnage spécial.
Prix du fascicule.................... **2** francs

On peut souscrire à une série de 6 fascicules (*Série Physico-Mathématique* ou *Série Biologique*) au prix de **10** francs.

A côté des revues périodiques spéciales, enregistrant au jour le jour le progrès de la Science, il nous a semblé qu'il y avait place pour une nouvelle forme de publication, destinée à mettre en évidence, par un exposé philosophique et documenté des découvertes récentes, les idées générales directrices et les variations de l'évolution scientifique.

A l'heure actuelle, il n'est plus possible au savant de se spécialiser; il lui faut connaître l'extension graduellement croissante des domaines voisins : mathématiciens et physiciens, chimistes et biologistes ont des intérêts de plus en plus liés.

C'est pour répondre à cette nécessité que, dans une série de monographies, nous nous proposons de mettre au point les questions particulières, nous efforçant de montrer le rôle actuel et futur de telle ou telle acquisition, l'équilibre qu'elle détruit ou établit, la déviation qu'elle imprime, les horizons qu'elle ouvre, la somme de progrès qu'elle représente.

Mais il importe de traiter les questions, non d'une façon dogmatique, presque toujours faussée par une classification arbitraire, mais dans la forme vivante de la raison qui débat pas à pas le problème, en détache les inconnues et l'inventorie avant et après sa solution, dans l'enchaînement de ses aspects et de ses conséquences. Aussi, indiquant toujours les voies multiples que suggère un fait, scrutant les possibilités logiques qui en dérivent, nous efforcerons-nous de nous tenir dans le cadre de la méthode expérimentale et de la méthode critique.

Nous ferons, du reste, bien saisir l'esprit et la portée de cette nouvelle collection, en insistant sur ce point, que la nécessité d'une publication y sera toujours subordonnée à l'opportunité du sujet.

Série Physico-Mathématique.

(Adresser les Communications à M. Ad. Buhl).

1. Poincaré (H.). *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes.*
2. Maurain (Ch.). *Le magnétisme du fer.*
3. Freundler (P.). *La stéréochimie.*
4. Appell (P.). *Les mouvements de roulement en dynamique.*
5. Cotton (A.). *Le phénomène de Zeemann.*
6. Wallerant (Fr.). *Groupements cristallins; propriétés et optique.*
7. Laurent (H.). *L'élimination.*
8. Raoult (F.-M.). *Tonométrie.*
9. Décombe (L.). *La célérité des ébranlements de l'éther.*
10. Villard (P.). *Les rayons cathodiques.*
11. Barbillion (L.). *Production et emploi des courants alternatifs.*
12. Hadamard (J.). *La série de Taylor et son prolongement analytique.*
13. Raoult (F.-M.). *Cryoscopie.*

14. MACÉ DE LÉPINAY (J.). *Franges d'interférences et leurs applications métrologiques.*
15. BARBARIN (P.). *La géométrie non euclidienne.*
16. NÉCULCÉA (E.). *Le phénomène de Kerr.*
17. ANDOYER (H.). *Théorie de la lune.*
18. LEMOINE (E.). *Géométrographie.*
19. CARVALHO (E.). *L'électricité déduite de l'expérience et ramenée aux principes des travaux virtuels.*
20. LAURENT (H.). *Sur les principes fondamentaux de la Théorie des nombres et de la géométrie.*
21. DÉCOMBE (L.). *La Compressibilité des gaz réels.*

Série Biologique.

(Adresser les Communications à M. le Dr LANGLOIS)

1. BARD (L.). *La spécificité cellulaire.*
2. LE DANTEC (F.). *La Sexualité.*
3. FRENKEL (H.). *Les fonctions rénales.*
4. BORDIER (H.). *Les actions moléculaires dans l'organisme.*
5. ARTHUS (M.). *La coagulation du sang.*
6. MAZÉ (P.). *Évolation du carbone et de l'azote.*
7. COURTADE (D.). *L'irritabilité dans la série animale.*
8. MARTEL (A.). *Spéléologie.*
9. BONNIER (P.). *L'orientation.*
10. GRIFFON (ED.). *L'assimilation chlorophyllienne et la structure des plantes.*
11. BOHN (G.). *L'évolution du pigment.*
12. COSTANTIN (J.). *Hérédité acquise.*
13. MENDELSSOHN (M.). *Les phénomènes électriques chez les êtres vivants.*
14. IMBERT (A.). *Mode de fonctionnement économique de l'organisme.*
15-16. LEVADITI (C.). *Le leucocyte et ses granulations.*
17. ANGLAS (J.). *Les Phénomènes des Métamorphoses internes.*

Série Physico-Mathématique.

No 1. — La Théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes, par H. POINCARÉ, de l'Institut.

TABLE DES MATIÈRES

N° 2. — **Le Magnétisme du Fer,** par Ch. Maurain, ancien élève de l'École normale supérieure, agrégé des Sciences physiques, docteur ès sciences.

TABLE DES MATIÈRES



N° 3. — **La Stéréochimie,** par P. Freundler, docteur ès sciences, chef de travaux pratiques à la Faculté des sciences de Paris.

TABLE DES MATIÈRES

N° 4. — **Les Mouvements de roulement en dynamique,** par P. Appell, de l'Institut.

TABLE DES MATIÈRES



d'appliquer directement les équations de Lagrange au nombre minimum des paramètres.

I. Sur les mouvements de roulement.

II. Sur certains systèmes d'équations aux différentielles totales.

N° 5. — Le Phénomène de Zeeman, par A. Cotton, maître de conférences de physique à l'Université de Toulouse.

TABLE DES MATIÈRES

N° 6. — Groupements cristallins, par Fréd. Wallerant.

TABLE DES MATIÈRES

N° 7. — L'Élimination, par H. Laurent, examinateur à l'École polytechnique.

TABLE DES MATIÈRES

N° 8. — Tonométrie, par F.-M. Raoult, membre correspondant de l'Institut. Doyen de la Faculté des sciences de Grenoble.

TABLE DES MATIÈRES

N° 9. — La Célérité des ébranlements de l'éther, par L. Décombe, docteur ès sciences.

TABLE DES MATIÈRES

CHAP. II. **Histoire de l'éther.** — *Lumière :* Théorie de l'émission. — Théorie des ondulations. — Principe d'Huygens. — Principe de Young. — Travaux de Fresnel. — Expérience de Foucault. — Périodes de vibrations. *Chaleur :* Théorie de l'émission. Calorique. — Rayons de différentes espèces. — Spectre calorique. — Unité du spectre. — Radiations chimiques. — Analogies optiques. — Nature de la chaleur. — Limites extrêmes du spectre. *Électricité :* Polarisation rotatoire magnétique. Nombre v de Maxwell. — Théorie électromagnétique de la lumière.

CHAP. III. **Les oscillations hertziennes.** — Formule de Thomson. — Champs oscillants. — Expériences de Feddersen. — Excitateur. — Excitateur de Hertz. — Excitateur de Lodge. — Excitateur de Blondlot. — Résonateur. — Propagation le long d'un fil. — Transparence électromagnétique. — Réflexion métallique. — Réfraction. — Interférences électromagnétiques. — Interférences dans l'espace. — Interférences le long des fils. — Expériences de Righi. — Polarisation. — Double réfraction. — Télégraphie sans fils. — Radioconducteur de Branly. — Conclusions.

CHAP. IV. **La formule de Newton.** — Hypothèses. — Centre de vibration. — Ondes sphériques. — Transversalité des vibrations. — Ondes planes. — Formule de Newton. — Influence du milieu. — Théorie de Fresnel. — Théorie de Neumann et de Mac-Cullagh. — Réfraction. — Dispersion. — Cas des phénomènes électriques. — Pouvoir inducteur spécifique. — Perméabilité magnétique.

CHAP. V. **La vitesse de la lumière.** — Essais de Galilée. — Les Académiciens de Florence. — Observations de Rœmer. — Calculs de Delambre. — Aberration. — Méthodes physiques. — Méthodes de la roue Dentée. — Expériences de Fizeau. — Expériences de M. Cornu. — Expériences de Young et Forbes. — Méthode du miroir tournant. — Expériences de Foucault. — Expériences de Fizeau et Breguet. — Expériences de Foucault. — Expériences de Micheson. — Expériences de Newcomb.

CHAP. VI. **La vitesse de l'électricité.** — Premiers essais. — Principe du miroir tournant. — Expérience de Wheastone. — Méthode des longitudes. — Expériences de Fizeau et Gounelle. — Expériences de Guillemin et Burnouf. — Expériences de Siemens. — Examen critique des méthodes précédentes.

CHAP. VII. **La vitesse de propagation de l'onde électromagnétique.** — Expériences de Blondlot 1893. — Expériences de Blondlot 1891. — Mesures directes. — Difficultés. — Expériences de Duane et de Trowbrige. — Expériences de Saunders. — Conclusion.

CHAP. VIII. **La dispersion dans le vide.** — Considérations générales. — Observation des satellites de Jupiter. — Observation des étoiles variables. — Observation de MM. Young et Forbes. — Observation des étoiles orbitales. — Principe de Döppler-Fizeau. — Analyse spectrale. — Remarque de M. Tikhoff. — Conclusion.

CHAP. IX. **L'éther de Maxwell.** — Constitution de l'éther. — Théorie de Maxwell. — Tourbillons moléculaires. — Déplacement électrique. — Courant électrique. — Courants d'induction. — Vitesse de propagation. — Nombre v de Maxwell. — Théorie électromagnétique de la lumière — Dispersion dans le vide. — Interférences.

N° 10. — Les Rayons cathodiques, par P. VILLARD, docteur ès sciences.

TABLE DES MATIÈRES

N° 11. — Production et Emploi des courants alternatifs, par L. Barbillion, docteur ès sciences.

TABLE DES MATIÈRES

N° 12. — La Série de Taylor et son prolongement analytique, par Jacques Hadamard.

TABLE DES MATIÈRES



N° 13. — **Cryoscopie,** par F.-M. Raoult, membre correspondant de l'Institut, doyen de la Faculté des sciences de Grenoble.

TABLE DES MATIÈRES

N° 14. — **Franges d'interférence et leurs applications métrologiques,** par J. Macé de Lépinay, professeur à la Faculté des sciences de Marseille.

TABLE DES MATIÈRES

N° 15. — La Géométrie non euclidienne, par P. Barrabin.

TABLE DES MATIÈRES

N° 16. — Le Phénomène de Kerr, par E. Néculcéa.

TABLE DES MATIÈRES

qualitatifs. — Expériences de Rœntgen. — Expériences de Brongersma. — Résultats quantitatifs. — Phénomène de Kerr dans un champ électrique uniforme. — Projection du phénomène. — Mesures absolues de la constance de Kerr.

CHAP. III. **Disparition instantanée du phénomène de Kerr.** — Méthode de M. R. Blondlot. — Expériences de MM. Abraham et J. Lemoine.

DEUXIÈME PARTIE. — *Théorie*. — CHAPITRE PREMIER. — **Essais théoriques de M. F. Pockels.**

CHAP. II. **Théorie de M. W. Voigt.** — Généralités. — Introduction du champ électrique extérieur. — Corps transparents. — Cas d'une bande d'absorption. — Conclusions. — Corps actifs. — Analogue du phénomène de Zeeman. — Corps isotropes; phénomènes de Kerr. — Généralisation de théorie. — Conclusion.

TROISIÈME PARTIE. — *Phénomène électro-optique analogue au phénomène de Zeeman.*

N° 17. — **Théorie de la lune,** par H. ANDOYER, professeur adjoint à la Faculté des sciences de l'Université de Paris.

TABLE DES MATIÈRES

N° 18. — **Géométrographie** ou art des constructions géométriques, par E. LEMOINE.

TABLE DES MATIÈRES



N° 19. — **L'Électricité déduite de l'expérience et ramenée aux principes des travaux virtuels**, par M.-E. Carvallo, docteur ès sciences, agrégé de l'Université, examinateur de mécanique à l'École polytechnique.

TABLE DES MATIÈRES

N° 20. — Sur les principes fondamentaux de la théorie des nombres et de la géométrie,

par H. LAURENT, examinateur à l'École polytechnique.

TABLE DES MATIÈRES

N° 21. — La Compressibilité des gaz réels,

par L. DÉCOMBE, docteur ès sciences.

TABLE DES MATIÈRES

Série Biologique.

N° 1. — **La Spécificité cellulaire,** ses conséquences en biologie générale, par L. Bard, professeur à la Faculté de médecine de Lyon.

TABLE DES MATIÈRES

N° 2. — La Sexualité, par Félix Le Dantec, docteur ès sciences.

TABLE DES MATIÈRES

N° 3. — Les Fonctions rénales, par H. Frenkel, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Toulouse.

TABLE DES MATIÈRES



N° 4. — **Les Actions moléculaires dans l'organisme,** par H. BORDIER, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Lyon.

TABLE DES MATIÈRES



Nº 5. — La Coagulation du sang, par Maurice Arthus, professeur de physiologie et de chimie physiologique à l'Université de Fribourg (Suisse).

TABLE DES MATIÈRES

Nº 6. — Évolution du Carbone et de l'Azote dans le monde vivant, par P. Mazé, ingénieur-agronome, docteur ès sciences, préparateur à l'Institut Pasteur.

TABLE DES MATIÈRES

CHAP. II. **Origines de l'azote organique.** — Nutrition azotée des plantes. Intervention de l'azote libre. Formation des composés quaternaires dans les végétaux supérieurs.

CHAP. III. **Dégradation de la matière organique.** — Rôle des animaux. Rôle des infiniment petits.

N° 7. — L'Irritabilité dans la série animale,

par le Dr DENIS COURTADE, ancien interne des hôpitaux, ancien chef de laboratoire à la Faculté de médecine, lauréat de l'Institut.

TABLE DES MATIÈRES

N° 8. — La Spéléologie ou science des cavernes,

par E.-A. MARTEL.

TABLE DES MATIÈRES



N° 9. — **L'Orientation,** par le Dr Pierre Bonnier.

TABLE DES MATIÈRES

N° 10. — **L'Assimilation chlorophyllienne et la structure des plantes,** par Ed. Griffon, ingénieur-agronome, docteur ès sciences.

TABLE DES MATIÈRES

N° 11. — **L'Évolution du Pigment,** par le Dr G. BOHN, agrégé des Sciences naturelles, préparateur à la Sorbonne.

TABLE DES MATIÈRES

Nº 12. — **L'Hérédité acquise,** ses conséquences horticoles, agricoles et médicales, par M.-J. COSTANTIN.

TABLE DES MATIÈRES

N° 13. — Les Phénomènes électriques chez les êtres vivants, par Maurice Mendelssohn.

TABLE DES MATIÈRES



N° 14. — Mode de fonctionnement économique de l'organisme, par le docteur A. Imbert, professeur à la Faculté de médecine de l'Université de Montpellier, membre correspondant de l'Académie de médecine.

TABLE DES MATIÈRES

N°s 15-16. — Le Leucocyte et ses granulations, par le Dr C. Levaditi, chef du Laboratoire de bactériologie et d'anatomie pathologique de l'hôpital Brancovano (Bucharest), lauréat de l'Institut (Académie des

Sciences). Avec une préface par le professeur Paul Ehrlich, directeur de l'Institut de thérapeutique expérimentale de Francfort-sur-le-Mein.

TABLE DES MATIÈRES

N° 17. — Les Phénomènes des Métamorphoses internes, par J. Anglas, docteur ès sciences.

TABLE DES MATIÈRES

l'abdomen. Muscles du thorax. Muscles péri-intestinaux. — III. *Histogenèse de l'intestin moyen.* — IV. *Origine des éléments imaginaux en général.* Muscles. Conjonctif. Intestin.

CHAP. V. **Le déterminisme de la métamorphose**. — I. *La théorie phagocytaire.* Les métamorphoses et les processus inflammatoires. — II. *Théorie de la crise génitale.* Objections. — III. *Théorie asphyxique.* Accumulation de CO^2 dans le milieu intérieur. Aucuns troubles de la nutrition (transpiration, glycogénie, troubles circulatoires). Relation entre l'asphyxie et la métamorphose. Phénomènes de pigmentation. — IV. *Théorie de l'arrêt physiologique.* Nécrobiose phylogénique et nécrobiose pathologique. Application à la loi de Geoffroy Saint-Hilaire. — V. *Éthologie des métamorphoses.* Passage de la vie pélagique libre à la vie sédentaire. Passage de la vie libre à la vie parasite. Passage de la vie aquatique à la vie aérienne. Changement de régime alimentaire ; cas des Insectes. Hypermétamorphoses. — VI. *Les métamorphoses et la loi de Fr. Müller.* — VII. *Préformation et épigenèse.* — VIII. *Y a-t-il substitution d'organismes ?* — IX. *Générations alternantes et métamorphoses.* Étendue et limites du terme métamorphose.

CONCLUSIONS.

Paris. — Imp. E. CAPIOMONT et Cie, rue de Seine, 57.



